Д. А. БАБЕНКО, С. И. ТЕПЛЕНКО
и Л. Д. ЧИБИШЕВ

В ПОМОЩЬ ЭЛЕКТРИКУ-ОБМОТЧИКУ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Издание второе, переработанное и дополненное



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1965 ЛЕНИНГРАД

УДК 621.313.33.045
Б 12

В книге рассматриваются устройство и принцип действия асинхронных трехфазных и однофазных электродвигателей, освещаются основные правила конструирования обмоток, даны схемы обмоток наиболее распространенных трехфазных и однофазных электродвигателей.

Дана технология выполнения обмоток с пайкой и без пайки схемы, указаны режимы пропитки и сушки статоров и роторов электродвигателей.

В доступной форме изложен сокращенный расчет обмоток электродвигателей и приведены примеры расчетов.

Книга предназначена для рабочих-обмотчиков и электриков-расчетчиков, работающих в области ремонта электрических машин.

Книга может быть также полезна студентам энергетических техникумов, осваивающих практические приемы выполнения обмоток и методы сокращенного расчета их.

Бабенко Демьян Алексеевич, Тепленко Сарра Исааковна, Чибишев Леонид Дмитриевич

В помощь электрику-обмотчику асинхронных электродвигателей, издание 2-е, переработанное и дополненное, М.—Л., издательство „Энергия", 1965, 256 с. с черт.

Тематический план 1965 г., № 84

* * *

Редактор *П. И. Цибулевский* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в пр-во 7/IV 1965 г. Подписано к печати 15/VI 1965 г.
Формат бумаги 84×108¹/₃₂ 13,44 п. л. 14,7 уч.-изд. л.
Т-06564 Тираж 22 000 экз. Цена 89 коп. Заказ 241

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати.
Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В создании материально-технической базы коммунизма ведущую роль играет электрификация, призванная обеспечить развитие всех отраслей народного хозяйства, их электровооруженность и технический прогресс.

Годовое производство электроэнергии к 1970 г. будет доведено до 900—1 000 млрд. *квт·ч*, что потребует резкого увеличения выпуска электродвигателей мощностью от 1 000 *квт* и более до долей ватт.

С каждым годом увеличивается количество установленных электродвигателей в промышленности, сельском хозяйстве, строительстве, на транспорте и связи. Растет число электродвигателей в установках, обслуживающих быт людей.

Высокая оснащенность различных предприятий, совхозов и колхозов электрооборудованием потребует от обслуживающего персонала — электриков умения не только правильно эксплуатировать электрические машины, но и квалифицированно ремонтировать их.

Одним из наиболее часто встречающихся видов ремонта является частичная или полная замена обмотки статора (иногда ротора) электродвигателей, что может выполнить электрик, изучивший основы конструирования и технологию производства обмоточных работ.

Оказать помощь начинающим электрикам-расчетчикам и электрикам-обмотчикам, а также обмотчикам, имеющим определенный опыт и стремление к повышению своей квалификации, — такова цель предлагаемой книги.

Во втором издании гл. 1, 3, 4, 7, 8 и 10 переработаны и дополнены; добавлены новые главы: 2, 5, 6, 9 и 11, в которых освещены вопросы конструирования обмоток однофазных односкоростных и трехфазных многоскоростных электродвигателей, методики расчета обмоток однофазных электродвигателей и испытания асинхронных трехфазных электродвигателей после ремонта.

Авторы выражают благодарность П. И. Цибулевскому за квалифицированное редактирование книги.

Авторы будут признательны всем тем, кто сочтет необходимым сообщить свои замечания и пожелания по данной книге.

Замечания, отзывы и пожелания просим направлять по адресу: г. Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10, издательство «Энергия».

Авторы

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОГО ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

1. ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, ПОНЯТИЕ ОБ ОДНОФАЗНОМ И ТРЕХФАЗНОМ ТОКЕ, СДВИГ ФАЗ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЕМ И ТОКОМ

Основными источниками электрической энергии являются: электрические генераторы постоянного и переменного тока, преобразовывающие механическую энергию в электрическую;

гальванические элементы и аккумуляторные батареи, преобразовывающие химическую энергию в электрическую;

термоэлементы и термоэлектробатареи, преобразовывающие тепловую энергию в электрическую;

фотоэлементы (вентильные) и солнечные батареи, преобразовывающие световую (лучистую) энергию в электрическую.

Промышленное значение пока имеют первые два вида источников электрической энергии, позволяющие вырабатывать ее в больших количествах.

Непосредственное превращение тепла и света в электрическую энергию характеризуется низким к. п. д. и незначительной мощностью, поэтому получаемый таким образом электрический ток в основном используется для производства различных измерений, сигнализации, телемеханики и связи.

В последнее время ведутся работы по созданию магнитогидродинамических генераторов, позволяющих

преобразовывать при высоком к. п. д. тепловую энергию сжигаемого топлива непосредственно в электрическую путем воздействия на быстро движущиеся ионизированные продукты сгорания (плазму) сильного магнитного поля.

С шин магнитогидродинамического генератора снимают постоянный ток, который в дополнительной установке может быть преобразован в переменный ток.

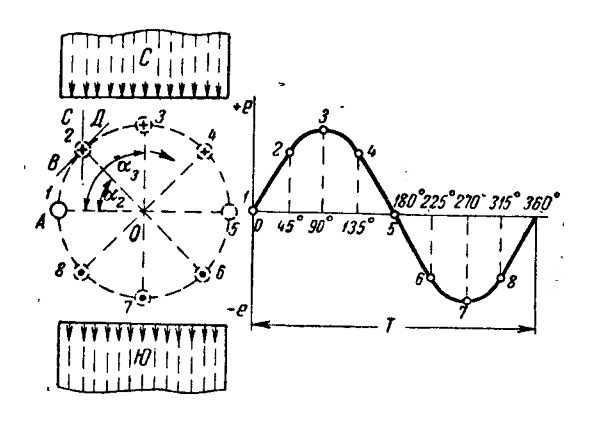


Рис. 1. Изменение э. д. с. в проводнике, вращающемся в магнитном поле.

Переменным током называется такой электрический ток, который непрерывно меняет свои величину и направление. Переменный ток практически применяется как однофазный, так и трехфазный.

Если проводник, обозначенный на рис. 1 кружочком, вращать по часовой стрелке в магнитном поле, созданном двумя полюсами магнита: *С* и *Ю*, то при пересечении им линий магнитной индукции в нем будет по закону электромагнитной индукции наводиться э. д. с.

Мгновенное значение индуктированной в проводнике э. д. с., e пропорционально магнитной индукции B, длине активной части проводника l, скорости вращения проводника v и синусу угла α, под которым проводник пересекает линии магнитной индукции, и выражается формулой

$$e = Blv \sin\alpha \cdot 10^{-8},\ \textit{в}. \qquad (1)$$

Индукция B выражается в гауссах*, длина l — в сантиметрах, скорость v — в сантиметрах в секунду.

Если проследить равномерное движение проводника по окружности в неизменяющемся равномерном магнитном поле (рис. 1), то заметим, что, достигнув точки *1*, проводник движется параллельно направлению линий магнитной индукции, не пересекая их, и поэтому наводимая в этой точке э. д. с. равна нулю, так как угол α между линией, касательной к окружности в точке *1*, показывающей направление движения проводника в данное мгновение времени, и линией, показывающей направление линий магнитной индукции, равен нулю, а синус угла, равного 0°, равен нулю. Следовательно, $e=0$.

Для определения величины угла, под которым проводник пересекает линии магнитной индукции в точке *2* (угол CBD), следует предварительно вычислить величину угла α_2, образованного линией, соединяющей проводник с центром окружности, и радиусом AO. Так как окружность на рис. 1 разделена на восемь равных частей, угол α_2 равен $360:8=45°$. Но угол CBD и угол α_2 равны, как имеющие взаимно перпендикулярные стороны. Поэтому угол, под которым проводник пересекает линии магнитной индукции в точке *2*, равен 45°, а синус угла, равного 45°, равен 0,707. Если предположить, что произведение $Blv \cdot 10^{-8}=20$, то э. д. с. в точке *2* будет равна

$$e_2=Blv \cdot 10^{-8} \sin \alpha_2=20 \cdot 0{,}707=14{,}14 \quad \textit{в}.$$

В точке 3 проводник пересекает линии магнитной индукции под углом 90°, т. е. движется перпендикулярно линиям магнитной индукции. В этом случае индуцированная э. д. с. будет иметь максимальную величину, так как синус угла, равного 90°, равен *1* и значение э. д. с. в точке *3* будет равно

$$e_3=Blv \cdot 10^{-8} \sin \alpha_3=20 \cdot 1=20 \quad \textit{в}.$$

* С 1 января 1963 г. введена Международная система единиц (СИ) как предпочтительная (ГОСТ 9867-61). Система МКСА на электрические и магнитные единицы (ГОСТ 8033-56) является составной частью Международной системы единиц. В системе СИ единицей магнитного потока является *вебер* (*вб*), а магнитной индукции — *тесла* (*вб/м²*).

1 *вб* $=10^8$ *максвелл*.

1 *тесла* $=10^4$ *гс*.

Точка 4 по расположению на окружности соответствует точке 2, почему и индуцированная э. д. с. будет равна

$$e_4 = 20 \cdot 0{,}707 = 14{,}14 \ \textit{в}.$$

Точка 5 соответствует точке 1, и индуцированная э. д. с. $e_5 = 0$.

Таким образом, э. д. с., индуцированная в движущемся по окружности в магнитном поле проводнике, будет плавно изменяться от нуля до максимальной величины в первой четверти окружности и от максимальной величины до нуля во второй четверти окружности.

Направление индуцированной в проводнике э. д. с. определяется по правилу правой руки, которое гласит: «если ладонь правой руки расположить так, чтобы линии магнитной индукции, выходящие из северного полюса, входили в нее, а отогнутый большой палец указывал направление движения проводника, то остальные четыре вытянутых пальца покажут направление индуцированной э. д. с.». На чертежах направление э. д. с. в проводнике от нас к плоскости чертежа принято обозначать крестиком, а от плоскости чертежа к нам — точкой. На рис. 1 направление э. д. с. в проводнике в первой и второй четвертях окружности будет иметь направление от нас к плоскости чертежа, что в точках *2*, *3* и *4* показано крестиками.

При движении проводника во второй половине окружности характер изменения индуцированной э. д. с. будет таким же, но направление ее изменится на обратное, т. е. э. д. с. будет направлена от плоскости чертежа к нам, что можно проверить, используя правило правой руки: руку следует повернуть вытянутыми четырьмя пальцами к себе, чтобы большой палец показывал изменившееся направление движения проводника (от точки *5* к точке *1*).

Изменение направления э. д. с. при движении проводника во второй половине окружности вполне закономерно, так как проводник в первой половине окружности проходил под северным полюсом, а во второй половине он проходит под южным полюсом, пересекая магнитное поле в обратном направлении. На рис. 1 направление э. д. с. в точках *6*, *7* и *8* показано точками.

Если концы проводника соединить непосредственно или через активную нагрузку, то при вращении в цепи

появится электрический ток, направление которого в любой момент и при любом положении проводника будет совпадать с направлением индуцированной в нем э. д. с. и изменяться соответственно изменению э. д. с., т. е. за один оборот проводника по окружности их величины будут дважды изменяться от нуля до максимальной величины и снова до нуля. Характер изменения э. д. с. и тока будет соответствовать характеру изменения величины синуса угла α, под которым проводник, двигаясь по окружности, пересекает линии магнитной индукции.

Физическая сущность этого явления заключается в том, что проводник, двигаясь по окружности в равномерном магнитном поле, в каждое мгновение изменяет угол α, в связи с чем изменяется и число пересекаемых проводником линий магнитной индукции. Наибольшее число линий магнитной индукции проводник пересекает, двигаясь перпендикулярно им, когда угол α равен 90° и синус угла α равен 1, а наименьшее число — когда угол α равен 0° и синус угла α равен 0. В остальных промежуточных положениях число пересекаемых проводником линий магнитной индукции будет пропорционально величине синуса соответствующего угла α.

Непрерывное изменение числа пересекаемых проводником линий магнитной индукции влечет за собой такое же непрерывное изменение (по закону синуса) величины наведенной в проводнике э. д. с., которая при $\alpha = 90°$ равна максимальной величине $E_{макс}$, а при $\alpha = 0°$ равна нулю. Для промежуточных значений угла α мгновенные значения э. д. с. могут быть определены по формуле

$$e = E_{макс} \sin \alpha. \qquad (2)$$

Если построить график изменения э. д. с. за один оборот проводника, где по вертикальной оси в определенном масштабе отложить величину э. д. с., а по горизонтальной — величину угла поворота проводника α для значений углов 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 и 360° и эти точки соединить плавной кривой, то полученная кривая, показывающая характер изменения индуцированной в проводнике э. д. с. в зависимости от перемещения проводника по окружности в равномерном магнитном поле, будет иметь вид синусоиды, а изменяющиеся по этому закону э. д. с. и ток будут называться

синусоидальными. Максимальные значения э. д. с. и тока, которых они достигают при своем изменении, называются амплитудой э. д. с. и тока. При повороте проводника в магнитном поле на следующие 360°, т. е. при втором обороте, э. д. с. и соответственно ток будут повторять цикл изменений.

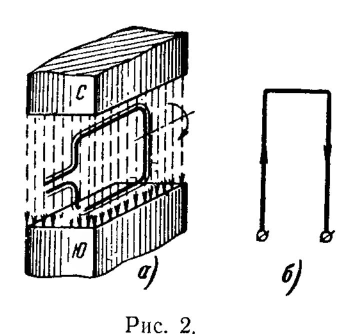


Рис. 2.
а — вращение витка в магнитном поле; *б* — направление э. д. с. в сторонах витка.

Время, в течение которого индуцированная э. д. с. (или ток) совершает полный цикл изменений, изменяясь от нуля до максимальной величины и от максимальной величины до нуля в положительном и отрицательном направлениях, называется периодом, который обычно измеряется в секундах и обозначается буквой T, а число периодов в единицу времени, т. е. в секунду, называется частотой и измеряется в герцах, где 1 *гц* есть один период в секунду.

В СССР стандартной частотой переменного тока приняты 50 периодов в секунду (50 *гц*). Время одного периода можно вычислить по формуле

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0{,}02 \textit{ сек.}$$

При вращении в магнитном поле двух проводников, расположенных диаметрально и соединенных последовательно, э. д. с. в них будет изменяться как и при одном проводнике, с той разницей, что в витке величина э. д. с. будет в аналогичных точках окружности в 2 раза больше, чем в одном проводнике.

На рис. 2,*а* показан виток в момент прохождения его проводников под серединами полюсов. Наводимые в проводниках э. д. с. имеют в данное мгновение максимальную величину, так как оба проводника пересекают линии магнитной индукции под углом 90°. Кроме того, при всех положениях этого витка э. д. с. проводников имеют противоположное направление и поэтому складываются (рис. 2,*б*).

Из сказанного следует, что для получения значительной по величине э. д. с. необходимо брать не один про-

вод и не один виток, а много последовательно соединенных витков, представляющих собой уже катушку, и вращать их в магнитном поле. На этом принципе основано получение однофазного переменного тока.

Если взять не один виток или катушку, а три, расположив их по окружности со сдвигом на 120°, и вращать в магнитном поле, то в каждой из них э. д. с. получится сдвинутой по времени одна относительно другой

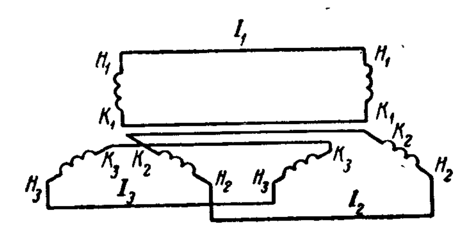


Рис. 3. Несвязанная система трехфазного тока.

на $^1/_3$ периода. При подключении к каждой из этих катушек нагрузки получаются три самостоятельные цепи однофазного переменного тока, нулевые значения и амплитуды которых сдвинуты на $^1/_3$ периода. Для подключения нагрузки к трем отдельным катушкам потребовалось бы подвести шесть проводов — три от источника тока к нагрузке и три от нагрузки к источнику тока (рис. 3). Такую систему трех однофазных токов называют несвязанной системой трехфазного тока. Практически такая система невыгодна из-за большого расхода меди. Пользуясь известным из электротехники положением, что сумма мгновенных значений токов в системе трехфазного тока равна нулю, три обратных провода заменяют одним проводом, соединив их концы в одну точку. Полученная система токов называется связанной системой трехфазного тока, или трехфазной системой (рис. 4), а каждая отдельная цепь этой системы — фазой. При равномерной нагрузке фаз можно обойтись и без нулевого провода. В этом случае фазы источника трехфазного тока соединяют звездой (рис. 5,*а*) или треугольником (рис. 5,*б*).

Дадим теперь обобщенное определение трехфазного тока.

Трехфазным током называют многофазную систему, которая состоит из трех однофазных токов одинаковой частоты, где токи каждой фазы сдвинуты между собой по времени на $^1/_3$ периода.

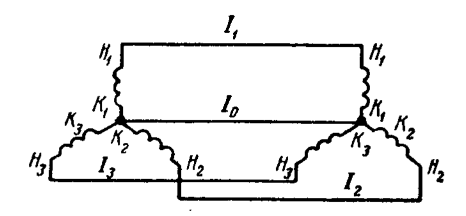


Рис. 4. Связанная система трехфазного тока.

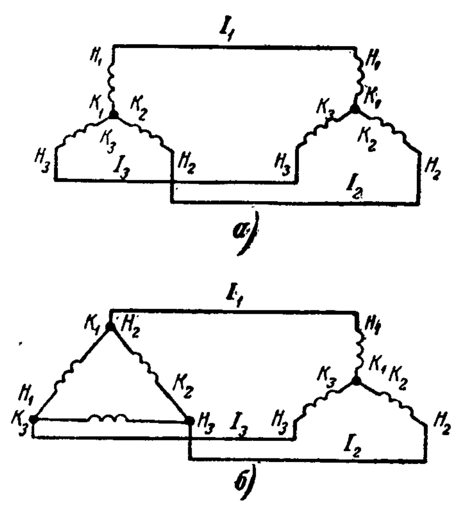


Рис. 5.

а — соединение источника трехфазного тока звездой; *б* — соединение источника трехфазного тока треугольником.

На рис. 6 приведены принципиальная схема генератора трехфазного переменного тока, имеющего два полюса, и график изменения э. д. с. Здесь все три фазы обмотки показаны сосредоточенно в виде трех витков, расположенных по окружности статора со сдвигом на угол 120°. Магнитное поле создается ротором, имеющим

на полюсах обмотку возбуждения и вращаемым посторонним двигателем, например гидротурбиной, паротурбиной, дизелем и т. п. Вместе с полюсами вращается и создаваемое ими магнитное поле, линии магнитной индукции которого пересекают неподвижные проводники обмотки статора генератора, наводя в каждой фазе переменные э. д. с., сдвинутые по времени на $^1/_3$ периода.

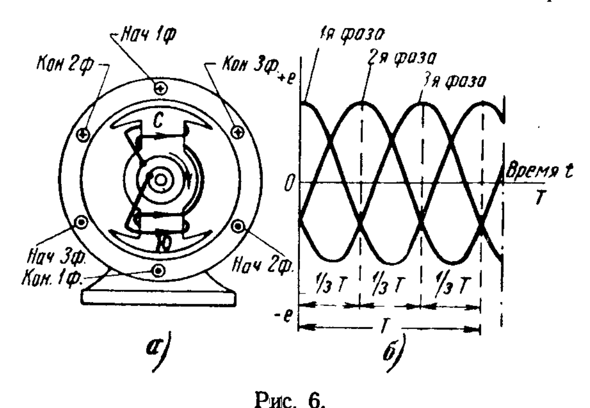


Рис. 6.

а — схема двухполюсного генератора трехфазного переменного тока; *б* — синусоида э. д. с.

Трехфазные генераторы обычно конструируют так, чтобы полюсы с катушками возбуждения, питаемые постоянным током, были расположены на вращающейся части машины (роторе), а генерирующая обмотка — в пазах неподвижной части (статоре). Иногда встречаются генераторы небольшой мощности с расположением полюсов возбуждения на неподвижной части машины (станине), а генерирующей обмотки — на вращающейся части (роторе). В первом случае линии магнитной индукции, выходящие из вращающихся полюсов, пересекают неподвижные провода генерирующей обмотки, расположенной в статоре, а во втором случае провода генерирующей обмотки, расположенные в роторе, пересекают линии магнитной индукции, выходящие из неподвижных полюсов. В обоих случаях в обмотке переменного тока наводится (генерируется) трехфазная переменная э. д. с.

Использование в современных генераторах электромагнитов вместо постоянных магнитов дало возмож-

ность получать сильные магнитные поля и соответственно большие э. д. с., что, однако, повлекло за собой неравномерное распределение магнитного потока по всей площади полюсов и вызвало необходимость получения синусоидальной э. д. с. в неравномерном магнитном поле, т. е. потребовалось найти способы получения такого магнитного поля, магнитная индукция которого изменялась бы в воздушном зазоре генератора приблизительно по синусоиде, что решено следующими путями.

В генераторах переменного тока с явно выраженными полюсами применены полюсные наконечники (башмаки) такой формы, чтобы воздушный зазор между полюсом и внутренней поверхностью статора был минимальным посредине и увеличивался от середины к краям полюса. При такой конструкции полюсов магнитная индукция будет иметь максимальную величину посредине полюса и уменьшаться к его краям, а форма кривой магнитной индукции при этом будет приближаться к синусоиде.

В генераторах с неявно выраженными полюсами, у которых величина воздушного зазора неизменна по всей окружности ротора, пазы и обмотка возбуждения в теле цилиндрического ротора распределяются так, что изменение магнитной индукции в воздушном зазоре происходит по синусоиде, а максимальная магнитная индукция посредине полюса убывает к его краям.

Имея в генераторах с явно и неявно выраженными полюсами синусоидальное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре и перпендикулярное направление линий магнитной индукции в расточке статора, легко вычислить величину э. д. с. для любого положения ротора генератора. Например, при пересечении проводника линиями магнитной индукции, выходящими из середины полюса и имеющими наибольшую густоту (наибольшую плотность), э. д. с. будет иметь максимальную величину и вычислена по формуле

$$E_{\text{макс}} = B_{\text{макс}}\, lv \cdot 10^{-8},\ \text{в}, \qquad (3)$$

где $E_{\text{макс}}$ — максимальное значение э. д. с., *в*;

$B_{\text{макс}}$ — максимальное значение магнитной индукции, *гс*;

v — скорость движения магнитного поля по отношению к проводнику, *см/сек*;

l — длина активной части проводника, *см*;

10^{-8} — множитель для получения э. д. с. в вольтах.

При пересечении проводника нейтральной линией, проходящей между краями полюсов, где магнитная индукция практически равна нулю, э. д. с. также равна нулю.

При всех промежуточных положениях ротора величина э. д. с. вычисляется по формуле

$$e = B_{\text{макс}}\, lv \sin\alpha \cdot 10^{-8},\ в,$$

или, пользуясь формулой (3),

$$e = E_{\text{макс}} \sin\alpha,\ в,$$

т. е. получается формула (2),

где α — угол поворота ротора[1].

Очевидно, что, вычислив величину э. д. с. для различных углов поворота ротора двухполюсного генератора и построив график изменения э. д. с. за один его оборот, мы получим такую же синусоиду, как на рис. 1.

Для того чтобы частота трехфазного переменного тока генератора была равна 50 *гц*, необходимо ротор вращать с определенной скоростью вращения. При двухполюсном генераторе за один оборот ротора произойдет полный цикл изменения э. д. с., что соответствует одному периоду T. Для того чтобы получить частоту э. д. с. и тока равной 50 *гц*, необходимо вращать ротор двухполюсного генератора со скоростью 50 *об/сек*, или $50 \cdot 60 = 3\,000$ *об/мин*. Для получения этой же частоты в четырехполюсном генераторе его следует вращать со скоростью, вдвое меньшей, чем двухполюсный. Это явление связано с тем, что при четырехполюсном роторе полный цикл изменения э. д. с. генератора произойдет за пол-оборота, так как виток успеет пройти за это время под северным и южным полюсами, а при одном обороте э. д. с. будет иметь два полных цикла, т. е. два периода.

---

[1] За начало отсчета угла поворота ротора следует принимать такое положение ротора, при котором нейтральная линия, или, точнее, нейтральная плоскость ротора, проходящая симметрично между краями полюса, пересекает взятый нами для исследования проводник.

На рис. 7 показаны изменение э. д. с. проводника, вращающегося в магнитном поле, создаваемом четырьмя полюсами, и график изменения э. д. с. за один оборот. Если при двух полюсах 360 *геометр. град* соответствовали одному периоду T, то при четырех полюсах ему уже будут соответствовать 180 *геометр. град.* Отсюда возникло понятие об *электрических градусах.*

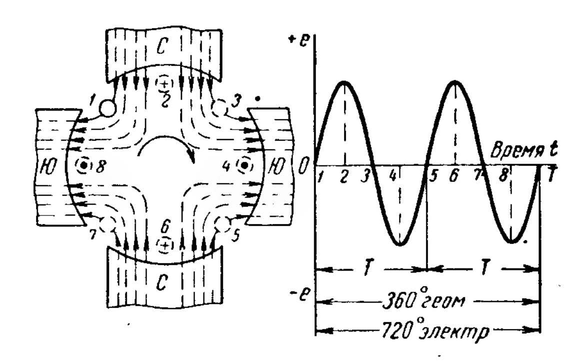


Рис. 7. Изменение э. д. с. в проводнике, вращающемся в магнитном поле, создаваемом четырьмя полюсами.

В двухполюсном генераторе геометрические и электрические градусы совпадают, так как за один оборот ротора э. д. с. совершает полный цикл изменения и имеет один период. Здесь 360 *геометр. град* равны 360 *эл. град.*

В четырехполюсном генераторе полный цикл изменения э. д. с. происходит при повороте ротора на 180 *геометр. град*, где один период получается за пол-оборота ротора, поэтому 180 *геометр. град* здесь соответствуют 360 *эл. град.*

В шестиполюсном генераторе 120 *геометр. град* соответствуют 360 *эл. град* и т. д.

Таким образом, полный оборот ротора соответствует: в двухполюсном генераторе — 360 *эл. град,* в четырехполюсном — 720, а в шестиполюсном — 1 080 *эл. град* и т. д. Из приведенного следует, что при увеличении числа полюсов генератора его необходимо вращать с меньшими скоростями, чтобы этим обеспечить стандартную частоту $f=50$ *гц*.

Требуемая скорость вращения определяется по формуле

$$n = \frac{60f}{p}, \tag{4}$$

где n — скорость вращения ротора в минуту;
f — частота, *гц*;
p — число пар полюсов генератора.

Например, при шестиполюсном генераторе скорость вращения его при частоте, равной 50 *гц*, будет:

$$n = \frac{60 \cdot 50}{3} = \frac{3\,000}{3} = 1\,000 \text{ об/мин.}$$

Полученная по этой формуле скорость вращения называется синхронной.

Как известно, для прохождения тока в замкнутой электрической цепи необходимо наличие э. д. с., которая поддерживает разность потенциалов, т. е. напряжение на зажимах источника электрической энергии.

Всякий проводник имеет то или иное сопротивление прохождению электрического тока. Величина сопротивления прохождения постоянного и переменного тока одного и того же проводника неодинакова. При переменном токе имеет место так называемый поверхностный эффект, т. е. вытеснение тока от центра проводника к его поверхности; поверхностные слои проводника пропускают большее количество электричества (электронов), внутренняя часть проводника — меньшее, а центральная часть проводника почти не участвует в процессе прохождения электрического тока. В результате такого неравномерного распределения электрического тока по сечению проводника общее сопротивление проводника переменному току будет больше, чем сопротивление постоянному току. С увеличением частоты переменного тока поверхностный эффект проявляется еще сильнее.

Кроме явления поверхностного эффекта, большое влияние на процесс прохождения электрического тока в цепях переменного тока оказывают индуктивность и емкость проводников, почему и сопротивления всех проводников (нагрузок) делятся на активные, индуктивные, емкостные и смешанные.

Чисто активное сопротивление практически имеют электрические лампы накаливания, спирали электрона-

гревательных приборов, электрических печей и т. п. Сопротивление перечисленных выше проводников постоянному току часто называют омическим сопротивлением. Величина сопротивления проводников постоянному току вычисляется по формуле

$$R = \rho \frac{l}{s}, \tag{5}$$

где ρ — удельное сопротивление проводника, *ом · мм²/м*;
l — длина проводника, *м*;
s — сечение проводника, *мм²*.

Проводники с активным сопротивлением потребляют из сети активную мощность, расходуемую на нагрев проводника.

Индуктивное сопротивление имеют катушки индуктивности, изготовляемые из провода с ничтожным по величине активным сопротивлением и большим числом витков. Величиной активного сопротивления в катушках индуктивности пренебрегают и считают, что практически они имеют только индуктивное сопротивление. Индуктивность, а значит, и индуктивное сопротивление катушки тем больше, чем больше ее диаметр, чем меньше ее длина при том же числе витков и чем больше число витков в ней. Индуктивное сопротивление катушек индуктивности и других проводников, имеющих индуктивное сопротивление, возрастает с увеличением частоты переменного тока, а также если внутрь их ввести стальной сердечник.

Катушки индуктивности активной мощности почти не потребляют; они потребляют реактивную мощность, расходуемую при намагничивании катушки и возвращаемую в сеть при ее размагничивании. Поэтому индуктивное сопротивление называют еще реактивным сопротивлением.

Емкостное сопротивление имеет конденсатор, величина которого уменьшается с увеличением его емкости и частоты сети. Конденсаторы активной мощности практически не потребляют, а только реактивную, расходуемую на заряд конденсатора и возвращаемую в сеть при разрядке. Емкостное сопротивление, так же как и индуктивное, называется реактивным.

Смешанным сопротивлением проводника называется такое сопротивление, которое состоит из активного и ре-

активного сопротивлений. На практике чаще всего встречаются активно-индуктивные сопротивления, так как обмотки электрических машин и трансформаторов являются именно такими сопротивлениями.

Если подключить проводник с активным сопротивлением к источнику переменного тока, напряжение которого изменяется по синусоиде, то возникший при этом ток также будет изменяться по синусоиде, где при активном сопротивлении электрической цепи напряжение и ток будут одновременно достигать положительного и отрицательного максимальных значений и одновременно проходить через нулевые значения. Если подобрать соответствующий масштаб для напряжения и тока и построить график изменения напряжения и тока по времени, то обе синусоиды совпадут во всех своих точках. В таких случаях принято говорить, что фазы напряжения и тока совпали или что сдвиг фаз между напряжением и током равен нулю. Здесь под словом фаза понимают не часть обмотки электрической машины, а состояние периодически изменяющейся величины, т. е. состояние синусоидального колебания напряжения и тока.

На рис. 8,*а* приведен график мгновенных значений напряжения, тока и мощности для цепи с активным сопротивлением. Напряжение и ток совпадают по фазе. Мощность совершает полный цикл изменения за полпериода, а за период она совершает два цикла, где обе кривые имеют положительное[1] значение.

Положительное значение мощности подтверждает, что вся мощность является активной и полностью используется (потребителем) для полезной работы.

Если взять проводник с индуктивным сопротивлением, например катушку индуктивности, и подключить его к источнику переменного тока, напряжение которого изменяется по синусоиде, то и ток будет изменяться по синусоиде, но нулевые и максимальные значения напряжения и тока уже не совпадут, а ток будет отставать

---

[1] Мгновенная мощность равна алгебраическому произведению мгновенного напряжения на мгновенный ток. При положительных или отрицательных значениях напряжения и тока мощность положительна; при разных значениях напряжения и тока мощность отрицательна.

от напряжения на $^1/_4$ периода, что соответствует сдвигу фазы на угол $\varphi=90°$.

На рис. 8,*б* приведен график мгновенных значений напряжения, тока и мощности для цепи с индуктивным сопротивлением. Рассматривая кривую мощности, видим,

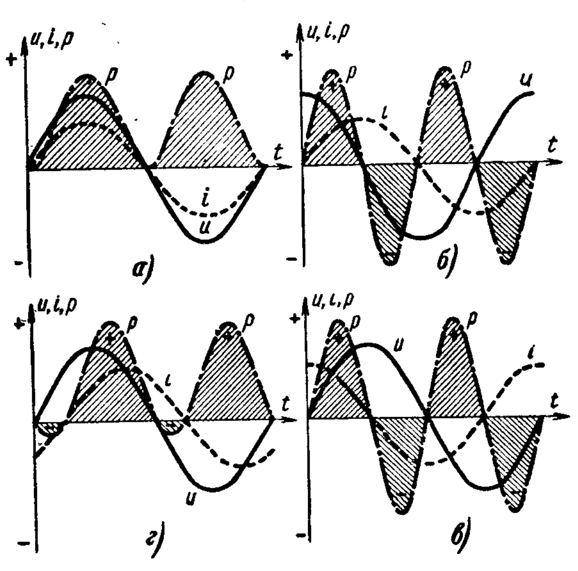


Рис. 8. График мгновенной мощности, напряжения и тока.

а — цепи с активным сопротивлением; *б* — цепи с индуктивным сопротивлением; *в* — цепи с емкостным сопротивлением; *г* — цепи с активным и индуктивным сопротивлением.

что в первую и третью четверти периода мощность имеет положительное значение, а во вторую и четвертую четверти периода — отрицательное значение. Та часть мощности, которая имеет положительное значение, забирается из сети и расходуется на намагничивание катушки индуктивности, а та, которая имеет отрицательное значение, создается катушкой при ее размагничивании и направляется в сеть к источнику электрической энергии. Поскольку положительная и отрицательная мощности равны, катушка индуктивности, а следовательно, и все проводники с чисто индуктивным сопротивлением активной мощности не потребляют, а потребляют толь-

ко реактивную мощность, которая в определенную часть периода забирается из сети, а в другую часть периода возвращается в сеть, загружая этим источник электрической энергии и линии электропередачи. Здесь следует знать, что чисто индуктивных сопротивлений не бывает, поэтому какая-то незначительная часть активной мощности потребляется проводником, имеющим индуктивное сопротивление, на нагрев проводов.

Если взять емкостное сопротивление, например конденсатор, и подключить его к источнику переменного тока, напряжение которого изменяется по синусоиде, то ток также будет изменяться по синусоиде, однако при чисто емкостной нагрузке он будет опережать напряжение на $^1/_4$ периода, т. е. сдвиг фаз между напряжением и током будет равен 90°.

На рис. 8,*в* приведен график мгновенных значений напряжения, тока и мощности для цепи с емкостным сопротивлением. Здесь, как и при индуктивном сопротивлении, в первую и третью четверти периода мощность имеет положительное значение, а во вторую и четвертую четверти периода — отрицательное значение. Это означает, что в начале каждого полупериода конденсатор забирает из сети электрическую энергию, расходуя ее на создание электрического поля: происходит заряд конденсатора, а в конце каждого полупериода происходит разряд его и он отдает запасенную в нем электрическую энергию обратно в сеть. Следовательно, активной мощности емкостное сопротивление не потребляет, а только реактивную, которая непроизводительно загружает как линию электропередачи, так и источник электрической энергии.

На рис. 8,*г* приведен график мгновенных значений напряжения, тока и мощности для цепи со смешанным сопротивлением, состоящим из активного и индуктивного сопротивлений. Соотношение величин активного и индуктивного сопротивлений взято такое, чтобы сдвиг фаз между напряжением и током был равен 45°, или $^1/_8\ T$.

Из графика рис. 8,*г* видно, что при смешанной активно-индуктивной нагрузке преобладающая часть мощности имеет положительное значение и только некоторая часть мощности имеет отрицательное значение. Это свидетельствует о том, что в данной цепи проводник потреб-

ляет и активную, и реактивную мощность, причем соотношение между этими мощностями зависит от сдвига фаз между напряжением и током, что в свою очередь определяется величиной активного и индуктивного сопротивлений.

На графиках рис. 8 сдвиг фаз между напряжением и током для большей наглядности выражен в долях периода *T*. Если выразить сдвиг фаз между напряжением и током в градусах и построить угол, соответствующий сдвигу фаз, то получится характерный в электротехнике угол φ, косинус которого показывает в долях единицы или при умножении на 100 в процентах количество активной мощности (или энергии), потребляемой проводником. Косинус φ называется еще коэффициентом мощности.

Потребляемая проводником (нагрузкой) активная мощность при однофазном токе вычисляется по формуле

$$P=UI\cos\varphi, \ \textit{вт}, \quad (6)$$

где U и I — действующие[1] значения напряжения и тока.

При трехфазном токе потребляемая проводником (нагрузкой) активная мощность вычисляется по формуле

$$P=3U_ф I_ф \cos\varphi, \ \textit{вт}, \quad (7)$$

где $U_ф$ и $I_ф$ — действующие значения фазного напряжения и фазного тока.

Произведение UI при однофазном токе и $3\,U_ф I_ф$ при трехфазном токе представляют собой полную мощность, которая является суммой активной и реактивной мощности. потребляемой проводником (нагрузкой).

При чисто активном сопротивлении нагрузки угол $\varphi=0°$, $\cos\varphi=1$ и активная мощность равна

$$P=UI\cos\varphi=UI\cdot 1=UI, \ \textit{вт}.$$

---

[1] Действующим значением переменного тока называется такой постоянный ток, который, проходя через то же сопротивление, что и переменный ток, выделяет в нем за одно и то же время одинаковое количество теплоты. Действующее значение переменного тока меньше амплитудного значения в $\sqrt{2}$ раз, т. е. в 1,41 раза. Действующее значение напряжения переменного тока меньше амплитудного значения также в 1,41 раза.

При чисто индуктивной и чисто емкостной нагрузках угол $\varphi=90°$, $\cos\varphi=0$ и активная мощность равна

$$P=UI\cos\varphi=0.$$

При смешанной активно-индуктивной нагрузке и сдвиге фаз $^1/_8$ T (рис. 8,*г*) угол $\varphi=45°$, $\cos\varphi=0{,}707$ и активная мощность равна

$$P=UI\cos\varphi=0{,}707\ UI,\ \text{вт}.$$

Последняя формула показывает, что если полную (кажущуюся) мощность принять за единицу, то для заданного сдвига фаз активная мощность составит 0,707 единицы; если полную мощность принять за 100%, то активная мощность составит 70,7%. Величина реактивной мощности в долях единицы будет равна $P_p=1-0{,}707=0{,}293$, в процентах $P_p=100-70{,}7=29{,}3\%$.

Из приведенных формул видно, что чем больше сдвиг фаз между напряжением и током в электрической цепи и чем меньше коэффициент мощности, тем потребляемая цепью активная мощность будет меньше, а реактивная — больше и, наоборот, чем меньше сдвиг фаз между напряжением и током и больше коэффициент мощности, тем больше потребляемая цепью активная мощность и меньше реактивная.

Существует ряд мер по ограничению потребления реактивной мощности, влияющих на повышение коэффициента мощности. Повышение коэффициента мощности ($\cos\varphi$) является важной общенародной государственной задачей.

2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОГО ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Действие асинхронного трехфазного электродвигателя основано на принципе взаимодействия вращающегося магнитного поля, создаваемого обмоткой статора при питании ее трехфазным переменным током, и магнитного поля, создаваемого током ротора.

Если поместить проводник в магнитное поле, создаваемое полюсами постоянного магнита, и пропустить через него постоянный ток (рис. 9,*а*), то он будет выталкиваться из магнитного поля силой, пропорциональной величине тока, длине активной части проводника и маг-

нитной индукции. Направление движения проводника определяется по правилу левой руки, которое можно сформулировать следующим образом: если расположить ладонь левой руки так, чтобы линии магнитной индукции, выходящие из северного полюса, входили в нее, а четыре вытянутых пальца показывали направление тока, то большой отогнутый палец покажет направление движения проводника.

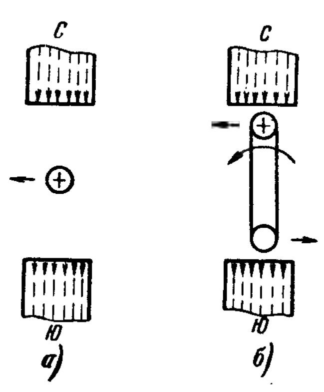


Рис. 9. Опыты со взаимодействием магнитных полей.

Если взять два проводника, соединенных в лобовой части, образующих виток (рис. 9,*б*), и пропустить через них постоянный ток, то верхний проводник будет выталкиваться влево, а нижний — вправо, т. е. получится в виде вертушки, вращающейся против часовой стрелки. При изменении направления тока так называемая вертушка будет вращаться по часовой стрелке.

Если взять статор асинхронного трехфазного электродвигателя и подключить его к сети трехфазного переменного тока, положив на поверхность его расточки стальной шарик, то он начнет вращаться по окружности расточки самостоятельно или после легкого толчка.

Если поместить внутрь расточки статора вертушку из медных проводов в виде беличьего колеса, она также будет вращаться. Этот опыт показывает, что в статоре электродвигателя, подключенном к электрической сети трехфазного тока, образовалось вращающееся магнитное поле.

Для уяснения, каким образом в статоре, питаемом трехфазным током, образовалось вращающееся магнитное поле, следует рассмотреть процесс изменения трехфазного переменного тока по синусоиде. Если изобразить схематически трехфазную обмотку статора двухполюсного электродвигателя, имеющего шесть пазов, фазы обмотки которого имеют по одной катушке, расположенной друг от друга по окружности статора на 120°, и соединить концы фаз C_4, C_5 и C_6 вместе (соединение в звезду),

а начала C_1, C_2 и C_3 подключить к трехфазной сети, то в обмотке статора будет проходить трехфазный переменный ток, который будет изменяться по синусоиде (рис. 10). Если разделить время, равное одному периоду T, на 12 равных частей (каждая часть будет соответствовать 30 *эл. град*) и обозначить намеченные моменты времени порядковыми номерами, вычертив в каждом макете статора схему расположения фаз обмотки, а крестиками и точками показать направление токов, то можно определить и направление результирующего магнитного потока в намеченные моменты времени. Как известно, направление линий магнитной индукции, образующихся вокруг проводника, по которому проходит ток, и расположенных вокруг него концентрически в виде замкнутых окружностей, определяется по правилу буравчика. Если острие буравчика расположить в направлении движения тока и вращать его так, чтобы он врезáлся в пространство или материал, то направление вращения рукоятки буравчика покажет направление линий магнитной индукции. Если в двух рядом лежащих катушках обмотки направление токов будет совпадать, то эти две катушки должны быть охвачены общей магнитной линией, имеющей такое же направление, как и магнитные линии отдельных катушек. Выполнив указанные построения, получим направление результирующего магнитного потока, показанного жирной стрелкой (рис. 10) для каждого

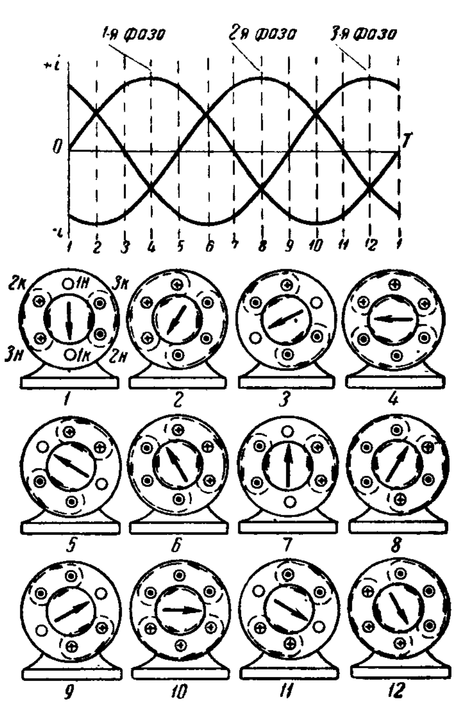


Рис. 10. Схема получения вращающегося магнитного поля.

выбранного момента времени. Из анализа направления результирующего магнитного потока в моменты времени от $t=0$ до $t=T$ видно, что магнитный поток с течением времени поворачивается по часовой стрелке и за время, равное полному периоду, совершает один оборот. Это и является наглядным доказательством того, что в статоре, имеющем трехфазную обмотку и подключенном к трехфазной сети, образовалось вращающееся магнитное поле, которое в двухполюсном статоре за один период T совершает один оборот. Если построить графическую схему для четырехполюсного статора, можно убедиться в том, что вращающееся магнитное поле за один период T, равный при частоте сети 50 *гц* 0,02 *сек*, совершит полоборота, а при шестиполюсном статоре $^1/_3$ оборота и т. д. Этим и объясняется, почему электродвигатели по мере увеличения числа полюсов становятся более тихоходными.

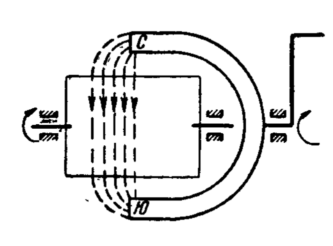


Рис. 11. Вращение замкнутого витка в магнитном поле, создаваемом при вращении постоянного магнита.

Если взять замкнутый виток, свободно вращающийся по оси, и вращать подковообразный постоянный магнит так, чтобы магнитный поток, создаваемый этим магнитом, пересекал активные[1] стороны витка (рис. 11), то полученное таким путем вращающееся магнитное поле по закону электромагнитной индукции будет наводить в проводниках витка э. д. с. Если бы проводники витка были соединены только с одной стороны, то в них тока не возникло бы и виток остался бы неподвижным. В замкнутом же витке ток будет создавать и свое магнитное поле. В результате взаимодействия этих двух магнитных полей возникнет электромагнитная сила, которая заставит виток вращаться в сторону вращения магнитного поля. Скорость вращения замкнутого витка будет не равна скорости вращения магнитного поля, а несколько

---

[1] Активными сторонами витка в данном случае являются те, которые расположены в горизонтальной плоскости (перпендикулярно направлению линий магнитной индукции) в зоне действия магнитного потока.

меньше, иначе не было бы явления пересекания проводниками витка линий магнитной индукции и не было бы индуцирования в нем э. д. с.

Такое вращение витка или системы витков называется вращением с асинхронной скоростью.

Принцип работы асинхронного электродвигателя заключается в том, что при подключении его к трехфазной сети в обмотке статора проходит трехфазный переменный ток, изменяющийся по синусоиде, что является причиной образования в электродвигателе вращающегося магнитного поля. Вращающееся магнитное поле, пересекая провода обмотки неподвижного ротора, наводит в ней э. д. с. Поскольку обмотка ротора является замкнутой цепью, в ней появляется ток. Ток ротора создает магнитное поле ротора, которое взаимодействуя с вращающимся магнитным полем, создает электромагнитную силу, заставляющую ротор вращаться в сторону движения вращающегося магнитного поля. Как показано на рис. 11, ротор при вращении всегда несколько отстает от вращающегося магнитного поля, причем это отставание, называемое скольжением, при холостом ходе меньше, а при нагрузке больше.

Таблица 1

Число пар полюсов	Количество полюсов	Синхронная скорость вращения, *об/мин*
1	2	3 000
2	4	1 500
3	6	1 000
4	8	750
5	10	600
6	12	500

Скорость вращения вращающегося магнитного поля называется синхронной скоростью, а скорость вращения ротора, изменяющаяся при данной частоте сети в зависимости от нагрузки электродвигателя, называется асинхронной скоростью, что и явилось основанием для названия таких электродвигателей асинхронными.

Синхронная скорость вращающегося магнитного поля определяется по формуле (4).

При стандартной частоте сети $f=50$ *гц* синхронная скорость вращения электродвигателя для различного числа пар полюсов приведена в табл. 1.

Понятие «скольжение»

Скольжение есть отношение разности чисел скорости вращающегося магнитного поля n_1 и ротора n_2 к скорости вращающегося магнитного поля:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

где s — скольжение в долях единицы;

n_1 — скорость вращения магнитного поля, *об/мин*;

n_2 — скорость вращения ротора, *об/мин*.

Для получения величины скольжения в процентах следует умножить величину скольжения на 100:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%. \quad (8)$$

При холостом ходе электродвигателя скольжение незначительное, так как без нагрузки скорость вращения мало отличается от скорости вращения магнитного поля. С ростом же механической нагрузки скорость вращения электродвигателя уменьшается и соответственно увеличивается скольжение. Величина скольжения при номинальной нагрузке для различных типов электродвигателей находится в пределах 1,5—8%.

3. УСТРОЙСТВО АСИНХРОННОГО ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ. СПОСОБЫ ПУСКА

Основными деталями асинхронного электродвигателя являются неподвижная часть — статор и подвижная — ротор.

Статор состоит из чугунной или алюминиевой станины, сердечника (пакета) и обмотки, называемой обмоткой статора.

Ротор состоит из сердечника (пакета), напрессованного на вал, двух нажимных шайб и обмотки, называемой обмоткой ротора.

Сердечники статора и ротора набираются из отдельных листов электротехнической стали толщиной обычно до 0,5 *мм*. Для уменьшения потерь на вихревые[1] токи

[1] Вихревыми токами называются электрические токи, возникающие в массивных стальных сердечниках, кожухах и других металлических частях вследствие наведения в них э. д. с. переменным магнитным потоком. Вихревые токи вызывают дополнительный нагрев электродвигателя.

листы стали сердечников изолируются друг от друга лаковой пленкой или слоем окисла, образующегося на листах в оксидировочной установке. В двигателях малой мощности изоляцией иногда служит слой окалины.

Между пакетом статора и пакетом ротора имеется воздушный зазор, величина которого для электродвигателей мощностью до 100 *квт* находится в пределах от 0,25 до 1 *мм*, возрастая с увеличением мощности и скорости вращения.

Вал ротора вращается в подшипниках качения и — реже — в подшипниках скольжения, расположенных в подшипниковых щитах, которые крепятся болтами к станине статора.

Роторы в зависимости от типа обмотки делятся на короткозамкнутые и фазные.

Обмотки короткозамкнутых роторов имеют форму беличьего колеса, состоящего из стержней и двух противоположно расположенных короткозамыкающих колец, получаемых путем заливки пазов сердечника ротора алюминием или укладки голых медных стержней с медными короткозамыкающими кольцами, соединяемых автогенной сваркой.

Обмотки фазных роторов существенного отличия от обмоток статора не имеют и выполняются изолированным проводом или стержнями, концы фаз которых соединяются в звезду или треугольник, а начала фаз выводятся к расположенным на валу стальным или латунным контактным кольцам, изолированным от вала и друг от друга. Для более плавного пуска к контактным кольцам подключается реостат, который уменьшает величину пускового тока и увеличивает пусковой момент вращения. Сопротивление пускового реостата подбирается так, чтобы сумма активных сопротивлений реостата и обмотки ротора не превышала суммы индуктивных сопротивлений обмотки ротора и статора[1]; в противном случае при дальнейшем уменьшении пускового тока пусковой момент вращения также будет уменьшаться. Электродвигатели с фазным ротором имеют, за редким исключением, щеткоподъемный механизм и короткозамыкающее устройство для замыкания обмотки ротора, минуя

[1] Активные и индуктивные сопротивления цепи ротора берутся приведенными к числу витков фазы обмотки статора.

реостат, и подъема щеток с контактных колец в целях уменьшения их износа при вращении ротора. Схема подключения пускового реостата в цепь фазного ротора приведена на рис. 12.

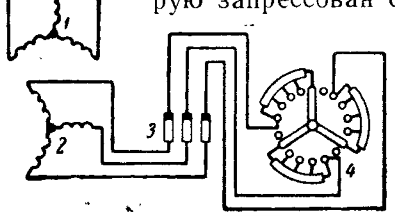


Рис. 12. Схема пуска асинхронного электродвигателя с фазным ротором.

На рис. 13 приведен электродвигатель с короткозамкнутым ротором типа А42-4 мощностью 2,8 *квт* защищенного исполнения со станиной на лапах.

На рис. 14 приведен этот же электродвигатель в разобранном виде. Станина *1* представляет собой чугунную оболочку, в которую запрессован сердечник статора, имеющий обмотку, показанную со стороны схемы. Выводы *4* обмотки статора выходят через два отверстия, расположенных в правой части станины (если смотреть со стороны привода), в коробку выводов *3*. Станина статора имеет с обеих сторон вентиляционные окна *5*. В верхней части станины закреплено на резьбе подъемное кольцо (рым) *6*. На лапах *2* станины имеется по два болтовых отверстия для крепления электродвигателя на месте установки. Ротор *7* состоит из вала и сердечника с короткозамкнутой алюминиевой обмоткой и вентиляционными крыльями, составляющими одно целое с клеткой ротора. С передней и задней сторон вала ротора расположены внутренние фланцы *9* и шарикоподшипники *10*. Каждый внутренний фланец имеет три жестко закрепленные шпильки, с помощью которых гайками *16* прикрепляются к подшипниковым щитам наружные фланцы *11*. Передний

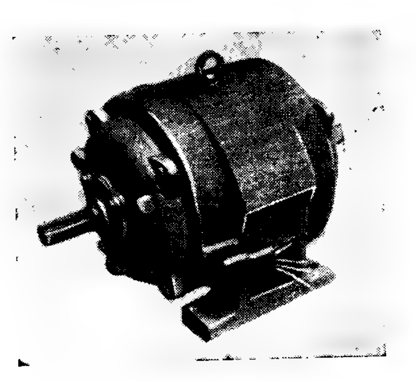


Рис. 13. Электродвигатель типа А42-4 мощностью 2,8 *квт*. Общий вид

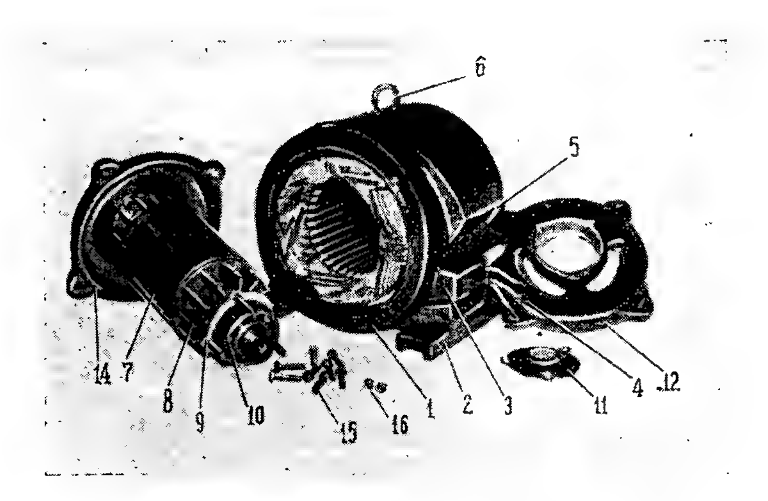


Рис. 14. Электродвигатель типа А42-4 мощностью 2,8 *квт* в разобранном виде.

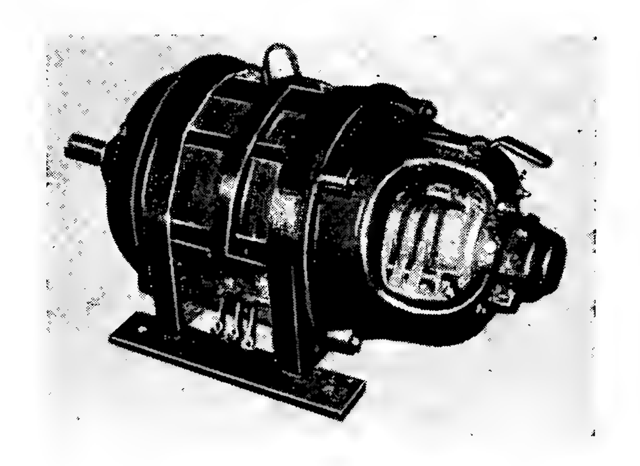


Рис. 15. Электродвигатель типа Т мощностью 29 *квт*. Общий вид.

подшипниковый щит *12* и задний подшипниковый щит *14* имеют по три вентиляционных окна и по четыре отверстия в проушинах, через которые проходят болты *15*, скрепляющие подшипниковые щиты со станиной статора.

Наружные фланцы и подшипниковые щиты имеют по три отверстия, через которые проходят шпильки внутренних фланцев. Вал ротора с обоих концов имеет шейки, а подшипниковые щиты имеют расточки, являющиеся посадочными местами для шарикоподшипников.

На рис. 15 приведен электродвигатель с фазным ротором типа *Т* с подшипниками скольжения мощностью

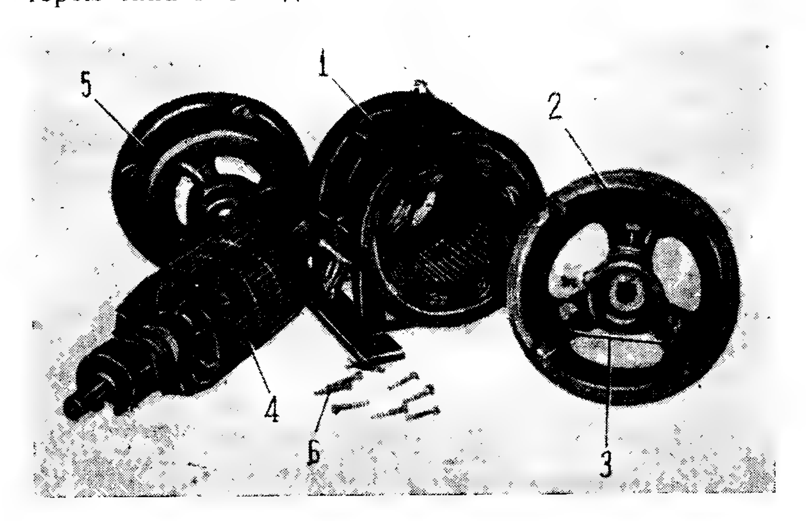


Рис. 16. Электродвигатель типа Т мощностью 29 *квт* в разобранном виде.

1 — станина; 2 — задний подшипниковый щит; *3* — щеткоподъемный механизм; *4* — ротор; *5* — передний подшипниковый щит; *6* — болты.

29 *квт*, 750 *об/мин*, в правой части которого находятся щеткоподъемный механизм и короткозамыкающее устройство.

На рис. 16 приведен этот же электродвигатель, но в разобранном виде.

Способ пуска короткозамкнутых электродвигателей

Электродвигатели с короткозамкнутым ротором в большинстве случаев подключаются непосредственно к сети при помощи трехполюсного рубильника, пакетного выключателя, пускового ящика, магнитного пускателя, контактора и т. п.

Недостатком такого прямого включения является большой пусковой ток, достигающий для электродвига-

телей до 100 *квт* 5—7-кратной величины номинального тока, вредно отражающийся на электродвигателе и питающей электросети, вызывающий недопустимое по величине падение напряжения в ней. Для уменьшения пускового тока чаще применяются следующие схемы включения.

Переключение обмотки статора со звезды на треугольник (рис. 17). Данная схема применяется в тех случаях, когда обмотка статора в рабочем состоянии соединена в треугольник. Для осуществления схем переключения обмотки статора электродвигателя со звезды на треугольник применяют специальные трехполюсные переключатели, которые при положении включающих ножей «пуск» замыкают обмотку статора в звезду, а при положении «работа» замыкают ее в треугольник. Переключение на треугольник производится после того, как электродвигатель развернется до полной скорости вращения.

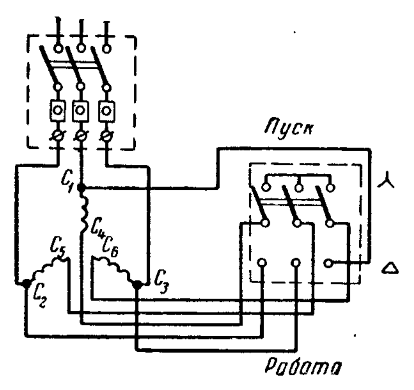


Рис. 17. Схема включения трехфазного электродвигателя с переключением обмотки статора со звезды на треугольник.

При способе пуска с переключением со звезды на треугольник пусковой ток уменьшается в 3 раза, так как при включении треугольником фазное напряжение обмотки статора равно линейному ($U_{ф\Delta} = U_{л\Delta}$), а при включении звездой фазное напряжение в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного ($U_{фλ} = U_{лλ} : \sqrt{3}$). Уменьшив таким образом фазное напряжение в $\sqrt{3} = 1{,}73$ раза, тем самым уменьшаем и фазный ток в 1,73 раза. Кроме того, при соединении схемы обмотки звездой линейный ток равен фазному ($I_{лλ} = I_{фλ}$), а при соединении треугольником линейный ток будет больше фазного в 1,73 раза ($I_{л\Delta} = I_{ф\Delta} \cdot \sqrt{3}$).

Следовательно, при пуске электродвигателя по схеме «звезда» пусковой ток уменьшается в 1,73 · 1,73—3 раза.

Одновременно с уменьшением пускового тока в 3 раза уменьшается и пусковой момент вращения в 3 раза, поэтому переключение схемы обмотки со звезды на треугольник применяется при пуске электродвигателей без нагрузки.

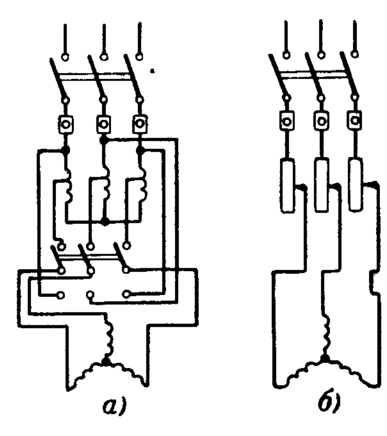


Рис. 18.

а — пуск электродвигателя при помощи автотрансформатора; *б* — пуск электродвигателя с реостатом в цепи статора.

Пуск короткозамкнутого электродвигателя при помощи автотрансформатора (рис. 18,*а*) уменьшает напряжение, подводимое к электродвигателю; тем самым уменьшается и пусковой ток.

Подключение электродвигателя на полное напряжение сети производится при помощи переключателя. При включении переключателя в положение «пуск» электродвигатель включается через автотрансформатор, а при включении переключателя в положение «работа» электродвигатель включается непосредственно в сеть.

Так как с уменьшением напряжения в первой степени момент вращения электродвигателя уменьшается во второй степени (т. е. в квадрате), этот способ пуска применяется при включении короткозамкнутых электродвигателей без нагрузки.

Пуск короткозамкнутых электродвигателей при помощи регулируемого пускового реостата, включенного в цепь обмотки статора (рис. 18,*б*), позволяет снизить подведенное к электродвигателю напряжение на величину падения напряжения в реостате. Вследствие уменьшения подведенного к электродвигателю напряжения уменьшается пусковой ток и одновременно уменьшается пусковой момент вращения. Поэтому и этот способ пуска пригоден лишь в том случае, когда электродвигатель пускается в ход без нагрузки.

Все рассмотренные способы пуска короткозамкнутых электродвигателей, кроме непосредственного включения, основывались на принципе подключения электродвигателя к пониженному напряжению, что наряду с уменьшением пускового тока вызывало уменьшение пускового момента вращения.

Для снижения величин пускового тока при большом пусковом моменте вращения промышленностью выпускаются короткозамкнутые электродвигатели с двойной беличьей клеткой или глубокими пазами ротора.

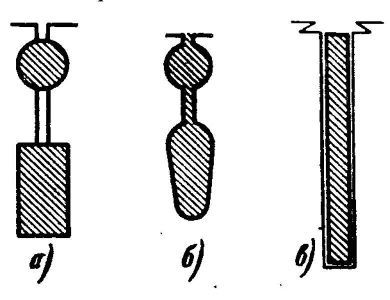


Рис. 19.

а — форма паза двухклеточного электродвигателя; *б* — то же; *в* — форма паза электродвигателя с глубоким пазом.

Электродвигатели с двойной беличьей клеткой имеют две друг над другом расположенные в специальных пазах короткозамкнутые обмотки ротора, где верхняя обмотка является пусковой, а нижняя — рабочей. Верхняя обмотка изготовляется из специального сплава, обладающего высоким удельным сопротивлением, и имеет большое активное и малое индуктивное сопротивления. Нижняя обмотка изготовляется из меди и имеет малое активное и большое индуктивное сопротивления.

В некоторых электродвигателях для пусковой и рабочей обмоток применяется одинаковый материал; разная величина активного сопротивления зависит только от величины сечений стержня пусковой и рабочей обмоток.

Разная величина индуктивных сопротивлений обусловлена тем, что пусковая обмотка расположена ближе к поверхности ротора, а рабочая — дальше от поверхности ротора.

Форма паза электродвигателя с двойной беличьей клеткой показана на рис. 19,*а* и *б*.

В начале пуска, когда частота тока в роторе равна частоте сети, ток в рабочей обмотке момента вращения почти не создает, так как в ней большое индуктивное сопротивление и малое активное, поэтому косинус φ мал

и активная мощность незначительна. В начале пуска вращающий момент создает пусковая обмотка, так как она имеет малое индуктивное сопротивление и большое активное сопротивление, поэтому косинус φ почти равен единице, а активная мощность создает момент вращения, достаточный для пуска электродвигателя. Величину активного и индуктивного сопротивлений пусковой обмотки выбирают так, чтобы получить необходимую кратность пускового момента вращения при определенной кратности пускового тока. С увеличением скорости вращения ротора частота тока в нем уменьшается и вследствие этого уменьшаются индуктивные сопротивления пусковой и рабочей обмоток, доходя до ничтожной величины при нормальной скорости вращения ротора. Ток нагрузки будет распределяться обратно пропорционально активным сопротивлениям, поэтому он почти полностью будет проходить по рабочей обмотке.

Электродвигатели с глубокими пазами ротора имеют обмотку, состоящую из узких, но высоких медных или алюминиевых стержней (рис. 19,*в*).

Для уменьшения пускового тока и увеличения пускового момента в роторах с глубокими пазами использовано явление вытеснения тока из нижней части проводника в верхнюю, отчего нижняя часть стержня при неподвижном роторе, когда частота в нем равна частоте сети, почти не проводит электрического тока; при этом активное сопротивление стержня увеличивается, а индуктивное — уменьшается. По мере увеличения скорости вращения электродвигателя происходит обратный процесс: активное сопротивление ротора уменьшается, а индуктивное — увеличивается. При нормальной скорости вращения, когда частота тока в роторе мала, вытеснение тока практически прекращается и электродвигатель, ротор которого имеет глубокий паз, работает как электродвигатель нормального исполнения.

Коэффициент мощности электродвигателей, роторы которых имеют двойную беличью клетку или глубокий паз, несколько ниже, чем у обычных короткозамкнутых электродвигателей.

ГЛАВА ВТОРАЯ

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННЫХ ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. СХЕМЫ ОДНОФАЗНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

4. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОГО ОДНОФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В отличие от трехфазных однофазные электродвигатели питаются от однофазной сети переменного тока. В соответствии с этим они могут иметь на статоре одну

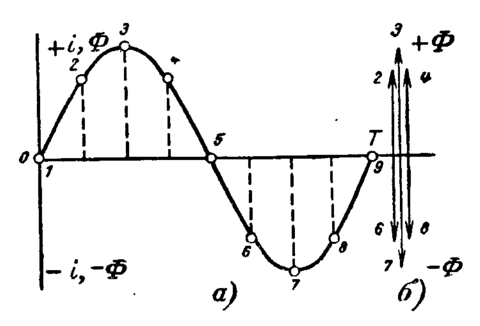


Рис. 20.

а — изменение магнитного потока в статоре однофазного двигателя; *б* — направление и относительная величина пульсирующего магнитного потока для разных точек синусоиды.

обмотку (фазу), подключаемую к сети. Обмотка ротора однофазного двигателя обычно выполняется в виде беличьей клетки.

Переменный ток, проходя по однофазной обмотке статора, создает пульсирующее магнитное поле, ось которого неподвижна в пространстве; а величина магнитного потока изменяется от +Ф до —Ф.

На рис. 20,*а* приведен график изменения тока и, следовательно, магнитного потока в обмотке статора однофазного электродвигателя, подключенного к сети переменного тока. Магнитный поток за период *T* увеличивается от 0 до $+\Phi_{макс}$, затем уменьшается от $+\Phi_{макс}$

до 0, после чего снова увеличивается, но в обратном направлении, от 0 до $-\Phi_{макс}$ и уменьшается от $-\Phi_{макс}$ до 0. На рис. 20,*б* показано направление пульсирующего магнитного потока.

Пульсирующий магнитный поток наводит в короткозамкнутой обмотке неподвижного ротора э. д. с. и ток, как во вторичной обмотке трансформатора. По правилу Ленца направление индуцированной э. д. с. всегда таково, что вызванный ею ток и его магнитное поле имеют такое направление, что они стремятся препятствовать причине, порождающей эту индуцированную э. д. с.

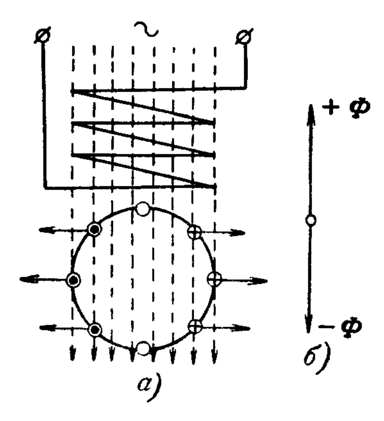


Рис. 21.
а — направление электромагнитных сил при неподвижном роторе однофазного двигателя и пульсирующем потоке; *б* — изменение пульсирующего потока за время *T*.

Следовательно, магнитный поток, возникший в обмотке неподвижного ротора, будет иметь направление, противоположное направлению магнитного потока статора. Соответственно этому при заданном (для данного мгновения времени) направлении магнитного потока в обмотке статора обозначены направления токов в стержнях обмотки ротора (рис. 21). Электромагнитные силы, возникающие в результате взаимодействия пульсирующего магнитного поля с токами ротора, проходящими в стержнях правой и левой половин ротора, равны по величине и направлены в противоположные стороны, вследствие чего они взаимно уравновешиваются и вращающего момента не создают, поэтому ротор самостоятельно прийти во вращение не может.

Если расположим на статоре две обмотки (фазы), сдвинутые по окружности статора на 90 *эл. град* и подключим двигатель к однофазной сети, то, как это видно на рис. 22,*а*, изменится только направление оси результирующего магнитного потока, образованного вследствие взаимодействия двух потоков: Φ_I и Φ_{II} (рис. 22,*б*) и увеличится амплитуда магнитного потока ($\Phi_{рез.макс}$).

Начального (пускового) вращающего момента двигатель, так же как и при одной обмотке, иметь не будет. Отсюда следует, что взаимодействие пульсирующего поля статора с током в проводниках ротора не может создать вращающего момента. Однако если посредством внешней силы развернуть ротор, то двигатель в дальней-

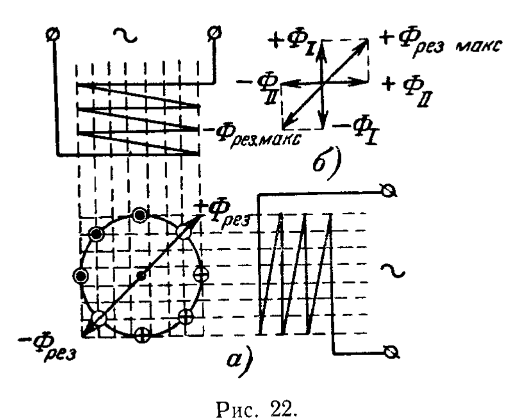


Рис. 22.

а — направление результирующего магнитного потока при сдвиге двух обмоток на 90°; *б* — сложение двух пульсирующих потоков;

шем будет вращаться самостоятельно и может быть нагружен.

Подобным образом ведет себя трехфазный электродвигатель при обрыве одного из питающих проводов. Если провод оборван у двигателя с неподвижным ротором, то при пуске ротор не придет во вращение. Если же провод оборван у трехфазного двигателя с вращающимся ротором, то двигатель будет продолжать работать как однофазный, развивая при этом мощность на валу, равную 50—60% номинальной.

Для уяснения указанных явлений заменим переменное пульсирующее поле однофазной обмотки статора двумя магнитными полями, вращающимися в противоположные стороны с синхронной скоростью n_1 и имеющими одинаковые по величине магнитные потоки, равные каждый половине пульсирующего потока Ф:

$$\Phi_I = \Phi_{II} = \frac{\Phi}{2}.$$

Геометрическая сумма потоков обоих вращающихся полей в любой момент времени равна потоку пульсирующего поля, как это видно из рис. 23. При неподвижном роторе оба поля вращаются относительно ротора с синхронной скоростью. Каждое из них индуцирует в обмотке ротора одинаковые по величине э. д. с. и токи. Последние, взаимодействуя с соответствующими полями, создадут одинаковые по величине вращающие моменты,

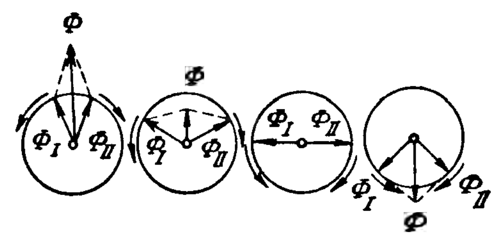


Рис. 23. Разложение пульсирующего поля на два вращающихся.

направленные в противоположные стороны и уравновешивающие друг друга. Следовательно, ротор самостоятельно не может прийти во вращение.

Если же, как указывалось выше, каким-либо способом привести ротор во вращение в любом направлении, то в этом направлении он будет продолжать вращаться и дойдет до скорости, близкой к синхронной. То поле, которое вращается в том же направлении, что и ротор, называется прямо вращающимся или прямым, другое поле называется обратно вращающимся или обратным. При вращении ротора оба эти поля неодинаковы. Обратное поле сильно ослаблено и при скорости, близкой к синхронной; результирующее поле становится почти круговым вращающимся полем.

Ослабление обратного поля при работе однофазного двигателя объясняется следующим образом. Ротор относительно прямого поля имеет скольжение s, а относительно обратного поля — скольжение

$$\frac{n_1 + n_2}{n_1} = \frac{n_1 + (1 - s) \cdot n_1}{n_1} = 2 - s,$$

где n_1 — скорость вращения поля (синхронная);

n_2 — скорость вращения ротора $[n_2 = n_1 - n_1 s = n_1(1 - s)]$.

Соответственно разным величинам скольжения ротора относительно прямого и обратного полей в обмотке ротора будут индуцироваться от прямого и обратного полей разные по частоте токи. Например, при скольжении $s=4\%$ ток от прямого поля будет иметь частоту $f'=sf_1=0{,}04\cdot 50=2$ *гц*, а ток от обратного поля будет иметь частоту $f''=(2-s)f_1=(2-0{,}04)\cdot 50=98$ *гц*. При такой большой частоте токов, наведенных обратным полем, индуктивное сопротивление обмотки ротора во много раз больше его активного сопротивления и токи от обратного поля будут почти чисто реактивными. Они будут оказывать сильное размагничивающее действие, т. е. ослаблять обратное поле, вследствие чего тормозящий момент, создаваемый этим полем, по мере нарастания скорости вращения ротора будет уменьшаться и при скорости, близкой к синхронной, станет незначительным.

Результирующий момент $M_{рез}$ однофазного двигателя будет равен разности вращающего момента M_I и тормозящего M_{II}:

$$M_{рез}=M_I-M_{II}.$$

Результирующий момент всегда направлен в сторону вращения ротора.

Если бы мы привели ротор двигателя во вращение в противоположную сторону (например, против часовой стрелки при вращении ранее по часовой), то прямое и обратные поля поменялись бы ролями и результирующий момент имел бы обратное направление, соответствующее тому направлению, в котором мы начали вращать ротор.

Из изложенного выше видно, что однофазный двигатель при подключении его к однофазному току не имеет пускового момента. Для того чтобы двигатель имел пусковой момент, необходимо создать в нем вместо пульсирующего круговое или эллиптическое вращающееся поле. Для этого надо расположить на статоре двигателя две обмотки, сдвинутые в пространстве на 90 *эл. град*, и добиться сдвига токов во времени в обмотках (для получения кругового вращающегося поля сдвиг токов обмотки A и обмотки B должен быть четверть периода, т. е. 90 *эл. град*, и, кроме того, должно быть соблюдено равенство н. с.: $I_A W_A = I_B W_B$).

На рис. 24,*а* приведен график изменения токов в обмотке (фазе) *A* и обмотке (фазе) *B* при сдвиге между токами $^1/_4$ *T* (90 *эл. град*). На рис. 24,*б* показаны направление токов в обмотках статора и направление результирующего магнитного потока для положений *1*, *2*, *3*, *4*, *5*, *6*, *7* и *8*, которые соответствуют временам $^1/_8$ *T*, $^1/_4$ *T*, $^3/_8$ *T*, $^1/_2$ *T*, $^5/_8$ *T*, $^3/_4$ *T* и $^7/_8$ *T*. Магнитный поток за период *T* повернулся на 360° против часовой стрелки, что подтверждает наличие в двигателе вращающегося магнитного поля, создающего вращающий момент как при пуске электродвигателя, так и в процессе его работы.

Рис. 24.
а — синусоиды токов обмоток *A* и *B*, сдвинутых во времени на $^1/_4$ *T*; *б* — схема получения вращающегося магнитного поля при двух фазах.

Сдвиг токов в обмотках *A* и *B* на 90 *эл. град* (четверть периода) достигается или подключением двигателя к двухфазному[1] току, или включением в одну из обмоток, которую называют вспомогательной, фазосмещающего элемента: емкости *C*, индуктивности *L* или активного сопротивления *R*. Иногда в цепь одной обмотки включают последовательно активное сопротивление, а в цепь другой — индуктивное сопротивление. Первый способ получения сдвига фаз между токами обмоток статора *A* и *B* применяется довольно редко, так как при этом требуется создавать специальную сеть двухфазного

[1] Двухфазным током называется система двух однофазных токов одинаковой частоты, сдвинутых по фазе на угол 90 *эл. град.*

тока и, следовательно, превращать электродвигатель по способу питания из однофазного в двухфазный.

Пользуясь фазосмещающими элементами, при втором способе сдвига фаз мы искусственно создаем питание двух обмоток статора двухфазным переменным током, но сдвиг между токами в зависимости от фазосмещающего элемента и величины нагрузки электродвигателя может значительно отклоняться от 90 *эл. град.*

Из изложенного выше видно, что принцип действия однофазного асинхронного электродвигателя по существу тот же, что и трехфазного, но способы создания вращающегося магнитного поля иные. Следует подчеркнуть, что в трехфазных электродвигателях создаются круговое вращающееся поле, а в однофазных — преимущественно эллиптическое и — только при определенных условиях — круговое.

Круговое вращающееся поле обеспечивает лучшие пусковые и рабочие свойства двигателя, чем эллиптическое, поэтому при конструировании и эксплуатации однофазных электродвигателей стремятся выполнить условия получения кругового вращающегося поля или хотя бы приблизиться к ним.

5. УСТРОЙСТВО АСИНХРОННЫХ ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. СПОСОБЫ ПУСКА

Основными деталями асинхронного однофазного электродвигателя, как и трехфазного, являются неподвижный статор и вращающийся ротор. Статор однофазного двигателя отличается от статора трехфазного только особым выполнением обмотки и иногда устройством для выводов.

Ротор выполняется обычно короткозамкнутым, реже — в специальных двигателях — фазным. Некоторые однофазные электродвигатели имеют встроенный на валу центробежный выключатель для отключения пусковой обмотки.

Все однофазные двигатели по способу питания являются однофазными, так как они подключаются к однофазной сети. По устройству обмоток они могут быть однофазными и двухфазными. Однофазными являются двигатели с пусковыми элементами во вспомогательной обмотке (фазе). Обе обмотки (фазы) этих двигателей

работают только при пуске, а в режиме холостого хода и нагрузки работает только одна обмотка, которую называют главной или рабочей. Вспомогательную обмотку, подключаемую лишь на период пуска электродвигателя, называют пусковой обмоткой или фазой. Можно точнее сказать, что двигатели с пусковыми элементами во время пуска являются двухфазными, а во время работы — однофазными.

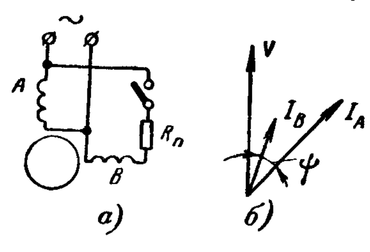


Рис. 25.
а — схема включения однофазного двигателя с пусковым (активным) сопротивлением; *б* — график направления токов в обмотках *А* и *В*.

Двухфазными являются электродвигатели с постоянно включенной емкостью и двумя постоянно включенными обмотками. Однако эти электродвигатели называют однофазными конденсаторными электродвигателями, подчеркивая этим то, что они питаются от однофазной сети и имеют постоянно включенный элемент — конденсатор. Конденсаторный электродвигатель может иметь, кроме постоянно включенного конденсатора, также пусковой.

Однофазные электродвигатели небольшой мощности с одной обмоткой на статоре пускают в ход при помощи механического приспособления, например пружины, или просто разворачивают электродвигатель от руки.

Наиболее распространенными способами пуска однофазных электродвигателей общего применения являются:

а) пуск с помощью вспомогательной (пусковой) обмотки, в цепь которой включен фазосмещающий элемент (сопротивление активное либо индуктивное или емкость).

б) Пуск с помощью неотключаемой вспомогательной обмотки, в цепь которой включена неотключаемая емкость (конденсатор).

в) Пуск с помощью неотключаемой вспомогательной обмотки, в цепь которой включены пусковая емкость (отключаемый конденсатор) и рабочая емкость (неотключаемый конденсатор).

г) Пуск с помощью короткозамкнутых витков, расположенных на расщепленных полюсах электродвигателя с явно выраженными полюсами и сосредоточенной обмоткой.

Схема пуска с помощью активного сопротивления в цепи пусковой обмотки приведена на рис. 25,*а*. В качестве активного сопротивления применяют иногда внешнее сопротивление, чаще же выполняют пусковую обмотку с повышенным активным сопротивлением.

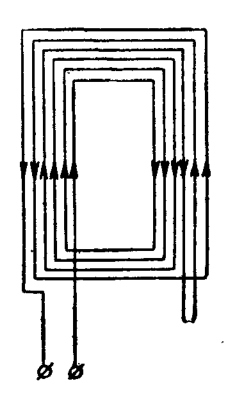


Рис. 26. Катушка с четырьмя бифилярными и двумя эффективными витками.

В последнем случае электродвигатели называют электродвигателями со встроенным пусковым сопротивлением. К ним относятся, например, электродвигатели единой серии АОЛБ. У этих электродвигателей главная (рабочая) обмотка занимает $^2/_3$ пазов статора, имеет относительно большое число витков и обладает значительным индуктивным сопротивлением. Пусковая обмотка занимает $^1/_3$ пазов статора, имеет меньшее число витков и, следовательно, меньшее индуктивное сопротивление, зато значительное за счет меньшего сечения провода активное сопротивление. С целью еще большего увеличения активного сопротивления пусковой обмотки часть ее выполняется бифилярно.

На рис. 26 показана катушка с шестью витками, два из которых намотаны встречно, в результате чего вся катушка имеет только два эффективных витка, так как четыре витка составляют бифилярную катушку, имеющую только активное сопротивление.

На рис. 25,*б* показан примерный график направления токов в обмотках электродвигателя с внешним (или встроенным) активным сопротивлением в цепи пусковой обмотки. Как видно на рисунке, угол между током рабочей обмотки I_A и током пусковой обмотки I_B меньше 90°. Даже в том случае, если мы в одну из обмоток включим большое активное сопротивление, а в другую — индуктивное, сдвиг токов не достигнет 90°, так как пусковая обмотка имеет какую-то индуктивность и ток,

проходящий по ней, не будет совпадать с направлением напряжения U_1 и, кроме того, рабочая обмотка имеет какое-то активное сопротивление, вследствие чего ток I_A, отставая от напряжения U_1, не составит с ним угол 90°.

Таким образом, однофазные электродвигатели с активным сопротивлением в цепи пусковой обмотки не имеют кругового вращающегося поля. Величину сопротивления (встроенного или внешнего) таких электродвигателей подбирают такой, чтобы обеспечить требуемый пусковой момент.

Выпускаемые в настоящее время однофазные асинхронные электродвигатели со встроенным пусковым сопротивлением типа АОЛБ охватывают диапазон мощностей от 18 до 600 *вт* при напряжениях 127, 220 и 380 *в*, частоте 50 *гц* и синхронных скоростях вращения 3 000 и 1 500 *об/мин*. Эти двигатели имеют неплохие пусковые и рабочие характеристики: отношение пускового момента к номинальному 1—1,2; отношение максимального момента к номинальному 1,4—2,2; к. п. д. электродвигателей нулевого и первого габарита в пределах 0,22—0,55; второго и третьего габарита — 0,47—0,69; коэффициент мощности 0,72—0,62. Однако электродвигатели типа АОЛБ имеют высокую кратность пускового тока $\left(\frac{I_{пуск}}{I_н} = 6{,}5 \div 9\right)$, значительно бо́льшую, чем все остальные типы однофазных двигателей.

Электродвигатели с повышенным сопротивлением в цепи пусковой обмотки используются в тех случаях, когда не требуются особо большие пусковые моменты (стиральные машины, холодильники, медицинские аппараты и т. п.).

При тяжелых условиях пуска в целях повышения пускового момента используются электродвигатели с пусковой емкостью. На рис. 27,*а* приведена схема включения однофазного электровигателя с пусковой емкостью, а на рис. 27,*б* — график направления токов в рабочей и пусковой обмотках статора. Подбором конденсатора соответствующей мощности можно получить угол Ψ между током рабочей обмотки I_A и током пусковой обмотки I_B равным 90°, т. е. обеспечить при соответствующем соотношении числа витков в обмотках круговое вращающееся поле в момент пуска электродвигателя

и тем самым достаточную кратность пускового момента. Однако для создания большого пускового момента даже у электродвигателей сравнительно небольшой мощности требуются значительные емкости, а следовательно, конденсаторы больших габаритов и высокой стоимости. Например, для получения кратности пускового момента

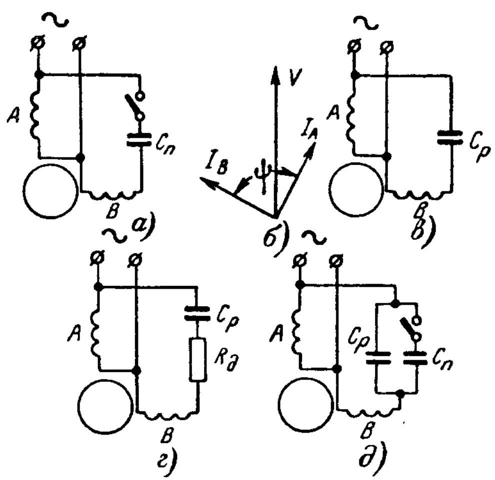


Рис. 27. Схемы включения однофазных двигателей.

а — с пусковой емкостью; *б* — график направления токов в обмотках *А* и *В* при включении электродвигателя с емкостью; *в* — с рабочей емкостью; *г* — с рабочей емкостью и добавочным активным сопротивлением; *д* — с пусковой и рабочей емкостью.

2,5 у однофазного электродвигателя мощностью 180 *вт*, 220 *в*, 50 *гц*, 1 420 *об/мин* требуется 10 конденсаторов типа КБГ-МН емкостью 4 *мкф* каждый с напряжением постоянного тока 600 *в*; размеры корпуса коденсатора 69×39×100 *мм*.

Однофазные электродвигатели с отключаемой пусковой обмоткой и пусковым конденсатором в разработанной ранее единой серии микроэлектродвигателей отнесены к типу АОЛГ. По величине мощности и рабочим характеристикам двигатели АОЛГ идентичны электродвигателям АОЛБ соответствующих габаритов. По пусковым характеристикам электродвигатели АОЛГ лучше. Они имеют кратность пускового момента $\left(\frac{M_{пуск}}{M_н}\right)$,

примерно в 2 раза бо́льшую, а кратность пускового тока $\left(\frac{I_{пуск}}{I_н}\right)$ в 2 раза меньшую, чем электродвигатели АОЛБ.

Однофазные электродвигатели с неотключаемой вспомогательной обмоткой и емкостью называют конденсаторными (рис. 27,*в*). Они являются по существу двухфазными электродвигателями, оси обмоток которых сдвинуты на 90 *эл. град*, а сдвиг во времени между токами обмоток создает емкость. Обмотку с включенным последовательно конденсатором называют вспомогательной или конденсаторной, другую — главной или рабочей; конденсатор называют рабочим.

При включении конденсаторного электродвигателя круговое поле может быть получено только при определенной нагрузке; для других нагрузок поле будет эллиптическим. Обычно подбирают обмоточные данные и емкость конденсатора так, чтобы круговое поле было при номинальной нагрузке.

В создании вращающего момента конденсаторного электродвигателя как при работе, так и при пуске в случае кругового поля в одинаковой мере участвуют обе обмотки статора, поэтому каждая из них занимает, как правило, половину всех пазов статора.

По рабочим характеристикам конденсаторные электродвигатели приближаются к трехфазным. По сравнению с однофазными электродвигателями, имеющими отключаемые (пусковые) обмотки с фазосмещающими элементами (активное сопротивление, емкость), конденсаторные электродвигатели обладают лучшими рабочими характеристиками: более высокими к. п. д. и $\cos\varphi$ и бо́льшим максимальным моментом. Пусковые характеристики конденсаторных электродвигателей также достаточно хорошие. Иногда для обеспечения равномерности хода электродвигателя и уменьшения вибраций в обмотку с постоянной емкостью включают активное сопротивление (рис. 27,*г*). Применяются конденсаторные электродвигатели для привода стиральных машин, насосов, мелких станков, вентиляторов и т. п.

В настоящее время выпускаются конденсаторные электродвигатели новой единой серии однофазных микроэлектродвигателей типа АВЕ, которые имеют высокий коэффициент мощности, доходящий до 1, высокий к. п. д., хорошие пусковые и рабочие характеристики.

Эти электродвигатели выпускаются мощностью от 10 до 400 *вт*, напряжением 127 и 220 *в*, скоростью вращения 1 000, 1 500 и 3 000 *об/мин* и должны заменить однофазные электродвигатели АОЛБ от нулевого до 2-го габарита.

К конденсаторным электродвигателям относятся также однофазные электродвигатели с двумя конденсаторами (рабочим и пусковым) в цепи вспомогательной обмотки (рис. 27,*д*). Наличие в схеме пускового конденсатора улучшает пусковые характеристики электродвигателя и позволяет подобрать рабочий конденсатор, исходя из требований рабочих режимов.

Электродвигатели с пусковыми и рабочими конденсаторами применяются для привода механизмов с нормальными и тяжелыми условиями пуска и возможными перегрузками. В разработанной единой серии однофазных асинхронных микроэлектродвигателей эти электродвигатели отнесены к типу АОЛД. При тех же габаритах, что и двигатели со встроенным сопротивлением (АОЛБ) и пусковой емкостью (АОЛГ), они имеют номинальную мощность, в 1,5 раза бóльшую, чем первые, за счет более высокого к. п. д. и коэффициента мощности. Однако высокая стоимость и большие габариты батарей конденсаторов являются причиной недостаточно широкого распространения электродвигателей с пусковым и рабочим конденсаторами.

Следует отметить, что все однофазные электродвигатели с пусковыми обмотками и фазосмещающими элементами в них должны иметь специальные пусковые устройства. По достижении скорости 0,75—0,8 синхронной пусковая обмотка размыкается и электродвигатель работает только с одной рабочей обмоткой, которая обычно создает в режиме нагрузки больший момент, чем при включении обеих обмоток (фаз). В конденсаторных электродвигателях с рабочей и пусковой емкостью пусковое устройство включает пусковой конденсатор на период пуска и так же по достижении скорости 0,75—0,8 синхронной пусковой конденсатор отключается. В качестве пускового устройства могут быть применены центробежный выключатель, кнопочный выключатель, реле максимального тока и пр.

Для получения обратного вращения (реверса) однофазного электродвигателя необходимо переключить вы-

воды одной из фаз статора, т. е. поменять местами в схеме начало и конец одной из обмоток.

Выше отмечалось, что к. п. д. и перегрузочная способность однофазных электродвигателей меньше, чем трехфазных. Уменьшение к. п. д. объясняется главным образом тем, что ток в роторе однофазного электродвигателя образуется наложением двух токов разных частот [f_s и $f(2-s)$]. Каждый из них создает потери в обмотке ротора, вследствие чего потери в роторе однофазного электродвигателя примерно вдвое больше потерь в роторе соответствующего трехфазного электродвигателя. Кроме того, потери в меди обмотки статора и потери в стали пакета ротора однофазных электродвигателей значительно выше, чем соответствующие потери трехфазного электродвигателя. Большие потери в обмотке ротора однофазного электродвигателя по сравнению с трехфазным способствуют возрастанию скольжения у однофазного электродвигателя, а последнее вызывает увеличение тормозящего момента, создаваемого обратновращающимся полем. По этой причине работа однофазного электродвигателя менее устойчива и его максимальный момент меньше, чем у соответствующего трехфазного электродвигателя. В связи с пониженной перегрузочной способностью мощность однофазных двигателей, за исключением двигателей с постоянно включенной емкостью, составляет 40—50% мощности трехфазных.

Среди однофазных асинхронных двигателей особое место занимают электродвигатели с расщепленными или экранированными полюсами. Статор этого электродвигателя, набранный из листов электротехнической стали, имеет два или четыре явно выраженных полюса со сосредоточенной обмоткой и короткозамкнутым витком из медного провода на каждом полюсе. Как видно из рис. 28, виток охватывает меньшую часть полюса. Вторая, не охваченная короткозамкнутым витком часть полюса иногда имеет дополнительную расточку для увеличения под этой частью полюса воздушного зазора, что способствует уменьшению провала в кривой пускового момента. Некоторые электродвигатели имеют на полюсе не один, а два или три паза и соответственно несколько короткозамкнутых витков, что тоже уменьшает провалы в кривой пускового момента. С целью увеличения вра-

щающего момента у большинства двигателей между наконечниками полюсов помещают магнитные шунты в виде стальных пластин.

Принцип действия двигателя с расщепленными полюсами заключается в следующем. Пульсирующий поток $Ф_1$, создаваемый током I_1 в главной обмотке полюса, индуцирует в короткозамкнутом витке полюса э. д. с. и ток I_2, значительно отстающий по фазе от тока I_1; ток I_2 создает свой пульсирующий поток $Ф_2$. В результате под той частью полюса, которая охвачена короткозамкнутым витком, будет действовать результирующий магнитный поток $Ф_B = Ф_1 + Ф_2$, амплитуда которого будет сдвинута во времени относительно амплитуды потока $Ф_1$, проходящего под остальной частью полюса. Помимо сдвига потоков, оси обеих частей полюса сдвинуты в пространстве на некоторый угол β и тем самым обеспечиваются условия для возникновения вращающегося (эллиптического) поля. Вращающееся магнитное поле индуцирует в беличьей клетке ротора токи, взаимодействие которых с данным полем создает вращающий момент электродвигателя.

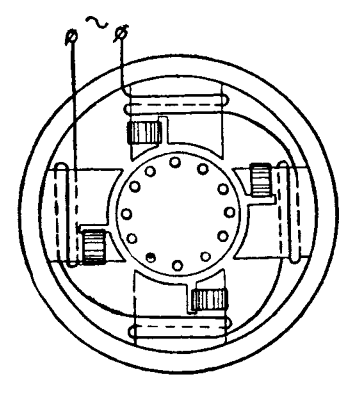


Рис. 28. Схема однофазного асинхронного двигателя с расщепленными полюсами.

Электродвигатель с расщепленными полюсами является нереверсивным: ротор вращается в направлении от неэкранированной части полюса к экранированной, т. е. имеющей короткозамкнутый виток.

Пусковые и рабочие параметры электродвигателей с расщепленными полюсами невысокие. Пусковой момент обычно не превышает 30% номинального, а в самых совершенных электродвигателях он не превосходит 60% номинального, к. п. д. в пределах 25—40%, а коэффициент мощности 0,4—0,6. Эти электродвигатели характеризуются также малой перегрузочной способностью; обычно отношение $M_{макс}/M_н$ не превосходит 1,1—1,25.

Достоинством двигателя с расщепленными полюсами являются простота устройства, отсутствие громоздких и дорогих фазосмещающих элементов и большая надежность. Этот электродвигатель может длительное время находиться под напряжением при неподвижном роторе, не боится частых пусков и внезапных остановок.

Двигатели с расщепленными полюсами выпускаются мощностью от долей ватта до 120 и — реже — 200—300 *вт* при напряжении 127 и 220 *в* и частоте 50 *гц*. Эти электродвигатели используются для привода вентиляторов, соковыжималок, сушилок, проигрывателей, мелких станков, небольших стиральных машин и т. п.

6. СХЕМЫ ОДНОФАЗНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Для включения трехфазного электродвигателя в однофазную сеть две фазные обмотки статора соединяют с линейными проводами, а третью фазную обмотку под-

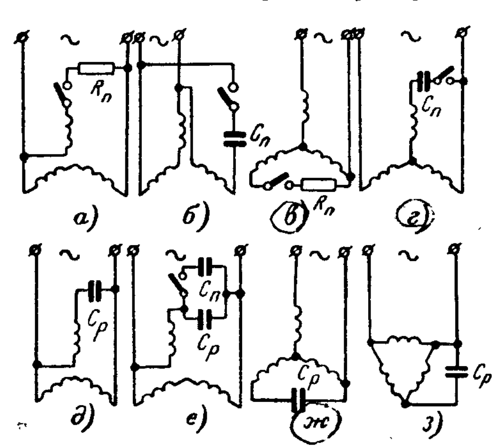


Рис. 29. Схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть.

ключают через фазосмещающий элемент в большинстве случаев к одному из линейных проводов, как указано на схемах рис. 29.

При таком включении в статоре трехфазного электродвигателя создается трехфазная несимметричная система токов. По окончании пуска обычно одна из фаз вместе с фазосмещающим элементом отключается и

электродвигатель переводится в однофазный режим, при котором обмотки статора создают не вращающееся, а пульсирующее магнитное поле (рис. 29,*а б*, *в* и *г*). Так как две фазы трехфазной обмотки образуют рабочую обмотку и занимают $^2/_3$ пазов статора, а третья фаза занимает $^1/_3$ пазов и образует пусковую обмотку, то при правильном выборе активного сопротивления или емкости пусковые и рабочие параметры таких электродвигателей соответствуют параметрам одинаковых по габаритам однофазных асинхронных электродвигателей единой серии с пусковой обмоткой и соответствующими пусковыми элементами.

Вполне удовлетворительные рабочие и пусковые характеристики имеют трехфазные электродвигатели, включенные в однофазную сеть по схемам однофазных конденсаторных электродвигателей с применением рабочих или рабочих и пусковых конденсаторов (рис. 29,*д*, *е*, *ж* и *з*). Схемы *а*, *б*, *е* и *д* рис. 29 применяются в том случае, когда начала и концы фаз выведены на клеммный щиток. Если же электродвигатель имеет три вывода, то применяют схемы *в*, *г*, *ж* и *з* рис. 29.

Некоторым недостатком включения трехфазных электродвигателей по схемам *а*, *б*, *е* и *д* является возможность провала в кривой вращающего момента при однослойной диаметральной обмотке статора. В этих случаях переходят на схемы *в*, *г* и *ж* рис. 29, примиряясь с некоторым уменьшением пускового момента.

Включение трехфазных электродвигателей по схеме однофазных с пусковыми обмотками позволяет использовать примерно 50% их мощности, а по схеме конденсаторных двигателей — до 70% при высоком коэффициенте мощности за счет сравнительно небольшого тока холостого хода.

Исключением являются универсальные микроэлектродвигатели, конструкция и обмоточные данные которых разработаны с учетом питания двигателя как от трехфазной, так и от однофазной сети. Например, асинхронный реверсивный электродвигатель типа ДВА-У5 имеет трехфазную обмотку, в однофазную сеть включается при напряжении 220 *в* по схеме рис. 29,*ж*, при напряжении 127 *в* — по схеме рис. 29,*з*, потребляет 36 *вт*, развивает полезную мощность 8 *вт* при $\eta = 0{,}22$ и $\cos\varphi = 0{,}82$. Этот же электродвигатель при работе от трехфаз-

ной сети потребляет 37 *вт*, развивает полезную мощность 9 *вт* при $\eta=0{,}24$ и $\cos\varphi=0{,}61$.

Соображения, из которых исходят при выборе активных сопротивлений и емкостей для включения трехфазных и однофазных электродвигателей в однофазную сеть, изложены в гл. 9.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

КОНСТРУИРОВАНИЕ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ВИДЫ ОБМОТОК

7. ЭЛЕМЕНТЫ ОБМОТОК

Обмотки электрических машин состоят из проводников, соединенных в определенной последовательности и уложенных в пазы пакета стали статора или ротора.

Два провода, расположенные в двух пазах и соединенные между собой по торцу статора или ротора, образуют виток.

Группу витков, уложенных соответствующими сторонами в два паза и соединенных между собой последовательно, называют катушкой. Часто вместо названия «катушка» применяют название «секция».

Число витков в катушке определяется расчетом и может быть равно одному, нескольким десяткам и даже сотням витков.

Для намотки катушек применяется изолированный обмоточный провод круглого или прямоугольного сечения, которое определяется расчетом и зависит от мощности, напряжения, конструкции и назначения электродвигателя. Если при расчете обмотки окажется, что диаметр изолированного провода превышает размер шлица паза, то во избежание выполнения обмотки методом протяжки катушку следует мотать двумя или тремя параллельными проводами с общим сечением, равным расчетному. В этом случае все параллельные провода считаются за один эффективный провод, а их общее сечение называется сечением эффективного провода.

При наличии параллельных ветвей в обмотке число

витков в фазе соответственно увеличивается, т. е. при двух параллельных ветвях число витков в фазе, а значит, и в катушке увеличивается вдвое, при трех параллельных ветвях—втрое и т. д. Соответственно уменьшается сечение провода, однако сечением эффективного провода считается то сечение, которое определено было расчетом, без учета как параллельных проводов, так и параллельных ветвей.

Пример. Расчетное сечение провода обмотки электродвигателя $F=8{,}4$ *мм*², диаметр 3,28 *мм*. В наличии имеем обмоточный провод диаметром 1,35 *мм* и сечением 1,431 *мм*², что в 6 раз меньше расчетного сечения. Обмотку можно выполнить в три параллельных провода н с двумя параллельными ветвями. В этом случае один элементарный провод будет иметь диаметр 1,35 *мм* и сечение 1,431 *мм*², три элементарных провода будут иметь сечение $3\times1{,}431=$ $=4{,}3$ *мм*², а сечение эффективного провода будет равно

$$F=1{,}431\cdot3\cdot2=8{,}6 \text{ мм}^2.$$

При отсутствии параллельных ветвей в обмотке три параллельных элементарных провода составляют один эффективный провод, а при наличии двух параллельных ветвей три элементарных провода в приведенном примере составят лишь $^1/_2$ эффективного провода. Это означает, что при наличии параллельных ветвей число одинарных, двойных или тройных проводов должно быть увеличено во столько раз, сколько имеется параллельных ветвей. Указанное в примере соотношение между сечением эффективного провода и сечением элементарного провода, между числом элементарных проводов и числом эффективных проводов следует учитывать при производстве расчета обмоток.

В катушках обмоток различают активную часть и лобовую часть. Активной частью катушки или провода называется та ее часть, которая расположена в пазу пакета статора или ротора, а лобовой частью — те части, которые расположены вне пакета, т. е. на торцах, и служат лишь для соединения активных частей проводов витка. Необходимо учитывать, что только в активной части проводов индуцируется э. д. с. от основного магнитного потока и создается вращающий момент в электродвигателе, поэтому чрезмерный вылет лобовых частей влечет за собой перерасход меди и других материалов, а также ухудшение электрических свойств электродвигателя.

Фазой обмотки электродвигателя называется часть обмотки с определенным числом катушек, соединенных последовательно, параллельно или смешанно. В трехфазных обмотках начала, концы, а следовательно, и середины фаз сдвинуты одна по отношению к другой на 120 *эл. град.*

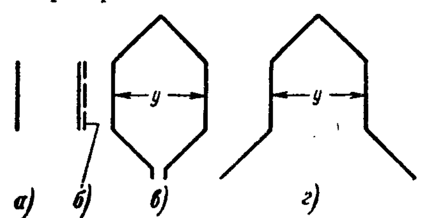


Рис. 30. Условные обозначения элементов обмоток.

Катушечной группой называется несколько катушек фазы, стороны которых расположены в рядом лежащих пазах (рис. 31). Имеются обмотки, у которых стороны катушечных групп расположены не в рядом лежащих пазах, а через паз. Кроме того, катушечная группа может состоять и из одной катушки. Условные обозначения элементов обмоток на схемах показаны на рис. 30 и 31.

Полюсным делением называется расстояние между осями двух соседних полюсов электродвигателя, получающихся в обмотке статора при прохождении по

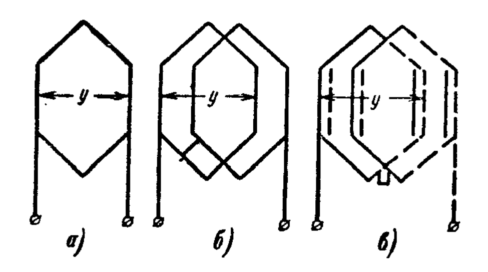


Рис. 31. Условные обозначения элементов обмоток.

ней трехфазного переменного тока. В двухполюсном электродвигателе полюсное деление равно 180 *геометр. град*, в четырехполюсном — 90°, в шестиполюсном — 60° и т. д. Полюсное деление измеряется, кроме геометрических градусов, и в зубцовых делениях, и числом пазов на полюс. Полюсное деление при любом числе пар полюсов равно 180 *эл. град*, так как два полюса в трехфазном электродвигателе соответствуют 360 *эл. град.*

Полюсным делением называется и часть дуги внутренней окружности (расточки) статора, приходящаяся на один полюс (рис. 32). Обозначается полюсное деление τ.

Шагом обмотки по пазам называется расстояние между активными сторонами катушки. Это расстояние измеряется в электрических градусах и определяется числом зубцов или числом пазов, расположенных между сторонами катушки. Результат измерения шага обмотки по пазам в электрических градусах будет правильным, если шириной катушки считать расстояние между осевыми линиями (серединами) активных сторон катушки; если же шириной катушки считать расстояние между ее внутренними сторонами, то только подсчет числа зубцов между сторонами катушки даст правильное число шага по пазам. Обычно шагом обмотки по пазам y называется число пазов, которое надо прибавить к номеру паза, в котором лежит первая сторона катушки, чтобы получить номер паза, занимаемого второй стороной катушки, или число зубцов, расположенных между сторонами катушки.

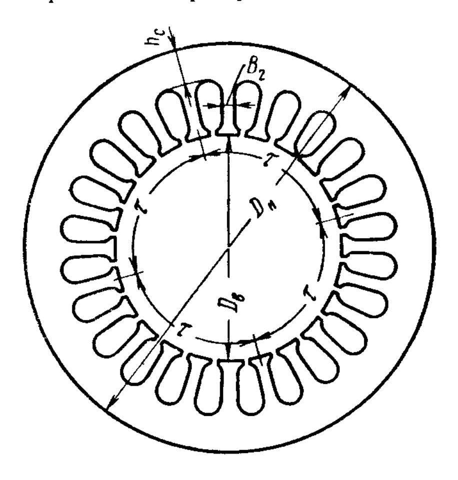


Рис. 32. Пластина пакета статора с нанесенными основными размерами и полюсными делениями (при четырех полюсах).

В рабочих чертежах и обмоточно-расчетных записках шаг обмотки по пазам часто обозначается двумя цифрами, показывающими, в какой паз должна быть уложена вторая сторона катушки, если первая сторона уложена в первый паз. Так, запись $y=1—7$ показывает, что шаг обмотки по пазам равен 6 и что если любой паз, в который вложена первая сторона катушки, назвать первым пазом, то вторая сторона катушки должна быть вложена в 7-й паз $(1+6)$.

Шаг обмотки может быть диаметральным, укороченным и редко — удлиненным.

Диаметральным шагом называется такой шаг, при котором расстояние между серединами сторон катушки равно полюсному делению τ. В двухполюсных электродвигателях при шаге обмотки по пазам, равном полюсному делению, стороны катушки будут расположены по линии диаметра расточки статора; при большем числе полюсов стороны катушки будут расположены по линии хорды, однако и в этих случаях название «диаметральный шаг» сохраняется, если он взят равным полюсному делению.

Укороченным шагом обмотки по пазам называется шаг, меньший по числу пазов, чем диаметральный.

8. ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА КОНСТРУИРОВАНИЯ ОБМОТОК СТАТОРА

При конструировании обмоток статора следует придерживаться следующих основных правил.

Все три фазы обмоток должны иметь одинаковое количество витков, одинаковое число катушечных групп и катушек, одинаково соединенных и симметрично расположенных по окружности статора.

Расстояния между началами и концами фаз должны быть сдвинуты на 120 *эл. град,* или $^2/_3$ полюсного деления. Это требование диктуется условиями симметрии обмотки и вытекает из того, что вращающееся магнитное поле, пройдя расстояние, соответствующее двойному полюснову делению 2τ, совершает путь, равный 360 *эл. град*, откуда 360 *эл. град* $=\alpha=2\tau$, а 120 *эл · град* $= \frac{1}{3}\cdot 2\tau$, или $\frac{2}{3}\tau$.

В зависимости от типа обмотки шаг по пазам должен быть диаметральным или с укорочением до 0,8 величины диаметрального. Шаг обмотки по пазам вычисляется, исходя из количества пазов статора z и числа полюсов электродвигателя $2p$. Например, если число пазов статора $z=24$, число полюсов $2p=4$, то диаметральный шаг обмотки по пазам равен:

$$y=\frac{z}{2p}=\frac{24}{4}=6 \text{ пазам},$$

откуда стороны катушки должны быть уложены в 1-й и 7-й пазы. При укороченном шаге на один паз шаг об-

мотки по пазам уже будет равен 5 и стороны катушки должны быть уложены в 1-й и 6-й пазы.

Число катушек в катушечной группе нельзя брать произвольным. Если, например, в статоре двухполюсного электродвигателя имеется 12 пазов, то на один полюс приходится шесть пазов и в этих шести пазах должны разместиться стороны катушек всех трех фаз, создающих данный полюс. Поэтому при конструировании и составлении схем обмотки число пазов на полюс и фазу является характерной и решающей величиной.

В приведенном примере число пазов на полюс и фазу равно 2[(12 : 2) : 3=2] и обозначается индексом q.

Таким образом, для подсчета величины q применяется следующая формула:

$$q = \frac{z}{2pm},$$

где z — число пазов статора или фазного ротора;

$2p$ — число полюсов электродвигателя;

m — число фаз.

Катушечные группы фазы соединяются в следующем порядке. При числе катушечных групп в фазе, равном числу полюсов электродвигателя, они соединяются в такой последовательности: конец первой катушечной группы соединяется с концом второй катушечной группы, начало второй катушечной группы соединяется с началом третьей катушечной группы, конец третьей катушечной группы соединяется с концом четвертой катушечной группы и т. д., т. е. соединяются конец с концом, начало с началом. Такое соединение относится ко всем двухслойным обмоткам и к тем однослойным, у которых катушечные группы разделены на катушечные полугруппы, и поэтому число полугрупп в фазе этих обмоток равно числу полюсов (однослойные обмотки «вразвалку»).

Если число катушечных групп в фазе меньше числа полюсов электродвигателя, соединения их выполняются следующим образом: конец первой катушечной группы соединяют с началом второй катушечной группы, конец второй катушечной группы соединяют с началом третьей катушечной группы и т. д., т. е. соединяются конец с началом. Началом катушечных групп принято считать левые концы выводов катушечных групп по ходу намотки статора против часовой стрелки. На рис. 33 и 34 по-

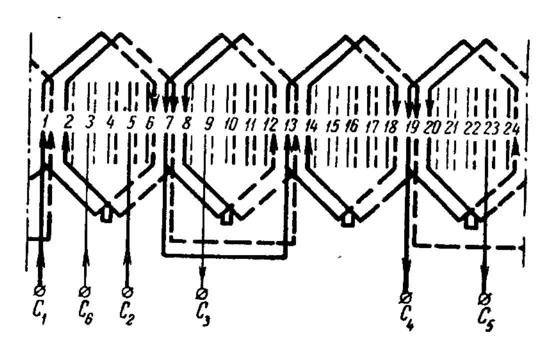


Рис. 33. Соединение катушечных групп в двухслойной обмотке.

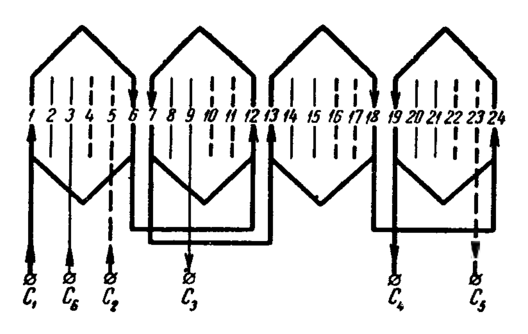


Рис. 34. Соединение катушечных групп в однослойной секционной обмотке «вразвалку».

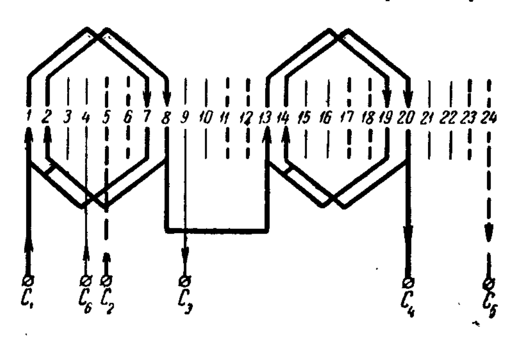


Рис. 35. Соединение катушечных групп в однослойной секционной обмотке.

казан первый вид соединений катушечных групп, а на рис. 35 — второй вид соединений.

Активные и индуктивные сопротивления фаз и параллельных ветвей должны быть одинаковыми, поэтому во всех трех фазах и в параллельных ветвях должно быть одинаковое число равных по размеру катушек, одинаковое число эффективных витков и одинаковое сечение эффективного провода.

При расчетах обмоток электрических машин вычисляется необходимое число эффективных витков в фазе, а потом число эффективных витков или эффективных проводов в пазу. Если обмотка выполнена в несколько параллельных проводов, например в три, то все три элементарных витка будут составлять один эффективный виток. При выполнении обмотки с несколькими параллельными ветвями число одинарных, двойных или тройных витков в фазе должно быть соответственно увеличено, но число эффективных витков в фазе, как и число эффективных проводов в пазу, от этого не должно меняться.

В целях большей равномерности магнитного потока в воздушном зазоре параллельные ветви в обмотках статора асинхронных электродвигателей составляются из расположенных подряд катушечных групп.

Параллельные ветви следует выполнять так, чтобы направление токов в проводах катушечных групп было таким же, каким оно было в обмотке без параллельных ветвей. На рис. 36 показаны соединения в параллельные ветви катушечных групп фазы электродвигателя с $2p=4$ при различных видах обмотки статора.

При замене типа обмотки, связанной с изменением шага по пазам, например при переходе с однослойной обмотки на двухслойную с укороченным шагом или наоборот, следует изменять и число эффективных витков в фазе.

При уменьшении шага следует увеличивать число эффективных витков, а значит, и число эффективных проводов в пазу, а при увеличении шага — уменьшать их; это объясняется тем, что при укороченном шаге э. д. с. катушки меньше э. д. с. катушки с диаметральным шагом, что компенсируется увеличением числа витков в катушке.

Отношение э. д. с. катушки при укороченном шаге к э. д. с. катушки с тем же числом витков при диаметральном шаге называют обмоточным коэффициентом укорочения.

Так как на величину э. д. с. фазы влияет также число катушек в катушечной группе (э. д. с. катушечной группы меньше э. д. с. одной катушки с тем же числом

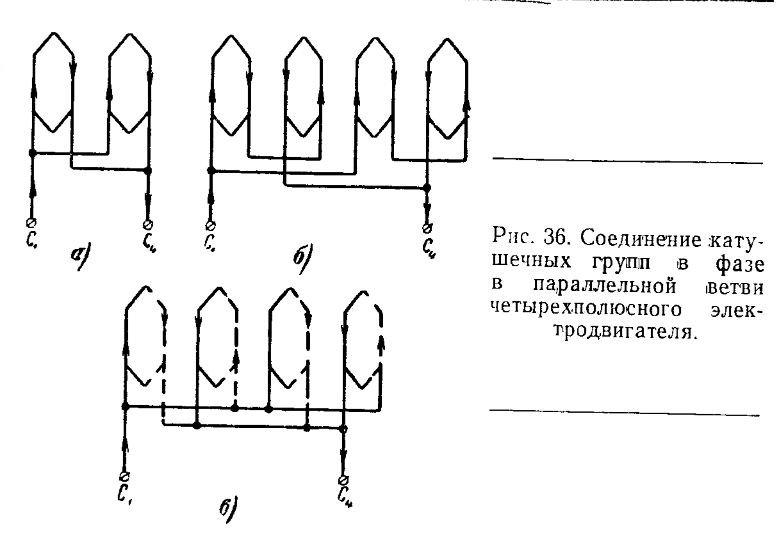


Рис. 36. Соединение катушечных групп в фазе в параллельной ветви четырехполюсного электродвигателя.

витков), при уточнении числа витков в фазе обмотки в связи с изменением шага по пазам одновременно следует учитывать и это положение, вводя дополнительно так называемый коэффициент распределения обмотки. При $q=1$ коэффициент распределения равен единице, при $q=2$ коэффициент распределения обмотки равен 0,966 и т. п. Для удобства такого вычисления оба эти коэффициента сводят в один, который называется «обмоточный коэффициент обмотки». В табл. 2 даны значения обмоточного коэффициента k_w в зависимости от числа катушек в катушечной группе и укорочения шага обмотки. Величину укорочения шага обмотки вычисляют по формуле

$$\beta_y = \frac{y_{\text{укороч}}}{y_{\text{диаметр}}}.$$

Таблица 2

Значение обмоточных коэффициентов k_w трехфазной обмотки

Число катушек в катушечной группе	Укорочение шага обмотки в долях единицы								
	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
1	1,000	0,997	0,988	0,972	0,951	0,924	0,891	0,853	0,809
2	0,966	0,963	0,954	0,939	0,919	0,893	0,861	0,824	0,781
3	0,960	0,957	0,948	0,933	0,913	0,887	0,855	0,819	0,777
4	0,958	0,955	0,947	0,931	0,911	0,885	0,854	0,817	0,775
5—7	0,957	0,954	0,946	0,930	0,910	0,884	0,853	0,816	0,774
8	0,956	0,953	0,945	0,929	0,909	0,883	0,852	0,815	0,773

При промежуточных значениях укорочения шага обмотки β_y величину обмоточного коэффициента k_w определяют следующим образом.

Если обмотка с укорочением шага $\beta_y=0,83$ и числом катушек в катушечной группе $q=3$, то по табл. 2 находят значение обмоточного коэффициента для расположенных подряд значений укорочения шага обмотки при $q=3$:

при $\beta_{y1}=0,85$ $k_{w1}=0,933$;

при $\beta_{y2}=0,80$ $k_{w2}=0,913$.

Вычисляют, на какую величину уменьшается обмоточный коэффициент при уменьшении укорочения шага обмотки на одну сотую доли единицы:

$$\frac{k_{w1}-k_{w2}}{85-80}=\frac{0,933-0,913}{5}=\frac{0,020}{5}=0,004.$$

Вычисляют, на какую величину уменьшается обмоточный коэффициент при $\beta_y=0,83$ по сравнению с обмоточным коэффициентом при $\beta_{y1}=0,85$:

$$0,004\,(85-83)=0,004\cdot 2=0,008.$$

Вычисляют обмоточный коэффициент для заданной обмотки:

$$k_w=k_{w1}-0,008=0,933-0,008=0,925.$$

9. ВИДЫ ОБМОТОК

Существует много признаков, по которым определяется классификация обмоток, и поэтому одним и тем же обмоткам часто даются различные наименования. Наиболее распространенные типы обмоток следующие.

5*

По способу заполнения пазов все обмотки делятся на однослойные и двухслойные. В однослойных обмотках сторона катушки заполняет весь паз, а в двухслойных сторона катушки заполняет половину паза, а другую половину заполняет сторона другой катушки.

Число катушек в однослойной обмотке равно половине числа пазов, так как одна катушка занимает два паза, а в двухслойной число катушек равно числу пазов, так как каждая катушка одной стороной занимает половину паза, а другой стороной — половину другого паза.

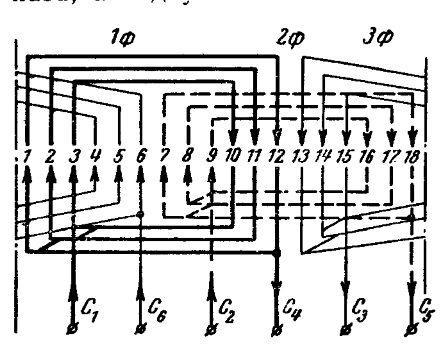


Рис. 37. Схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки. $z=18$; $2p=2$; $q=3$; $y_1=7$; $y_2=9$; $y_3=11$.

По числу фаз обмотки делятся на однофазные и многофазные. Из многофазных обмоток практический интерес представляют трехфазные.

По виду витков и катушек обмотки делятся на волновые и петлевые. Волновые обмотки роторов называются и стержневыми, так как элементом обмотки является полувиток, состоящий из стержня. Все остальные обмотки статоров и роторов асинхронных электродвигателей являются петлевыми. Если катушки имеют разные шаги, причем одна катушка охватывает другую, то такие обмотки можно называть обмотками с концентрическими катушечными группами. Однако многие называют их «катушечными», «катушечно-концентрическими» или «концентрическими».

На рис. 37 изображена однослойная катушечная (концентрическая) обмотка двухполюсного электродвигателя, статор которого имеет 18 пазов. Число катушек в катушечной группе $q=3$ и число катушечных групп в обмотке тоже равно 3, так как в однослойных обмотках число катушечных групп равно числу фаз, помноженному на число пар полюсов; отсюда число катушечных групп равно будет $mp=3p$, где p — число пар полюсов, а $2p$ — число полюсов.

Шаги обмотки по пазам в катушках катушечной группы этой обмотки, как и во всех катушечных (концентрических) обмотках, разные:

$$y_1=7;\ y_2=9;\ y_3=11,$$

а диаметральный или средний шаг y при $z=18$ и $2p=2$ равен $z:2p=18:2=9$. Правильность принятых шагов по пазам катушек этого вида обмоток проверяется сле-

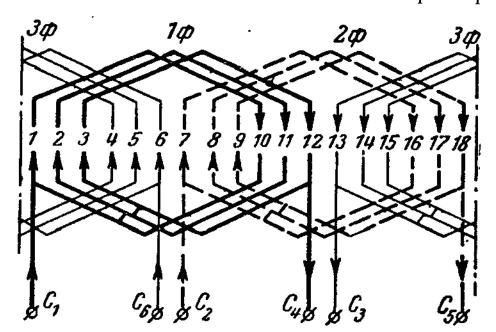


Рис. 38. Схема однослойной секционной обмотки.
$z=18$; $2p=2$; $q=3$; $y=9$.

дующим методом. Шаги всех катушек катушечной группы складываются, и полученное число делится на число катушек в катушечной группе; результат должен быть равен величине диаметрального шага:

$$y_{ср}=(y_1+y_2+y_3):3=(7+9+11):3=27:3=9.$$

В данной обмотке имеется одна катушка с несимметричными лобовыми частями, которые бывают в катушечных (концентрических) обмотках с нечетным числом пар полюсов.

Если катушки катушечной группы имеют одинаковый шаг и одинаковые размеры, то такие обмотки иногда называются однослойными шаблонными обмотками.

На рис. 38 изображена схема однослойной секционной обмотки двухполюсного электродвигателя. Статор имеет 18 пазов. Число катушек в катушечной группе 3, число катушечных групп в фазе 1, шаг по пазам $y=9(1-10)$, т. е. обмотка выполнена с диаметральным шагом.

Разновидностью однослойных катушечных (концентрических) обмоток и однослойных секционных обмоток являются однослойные катушечные (концентрические) обмотки «вразвалку» и однослойные секционные обмотки «вразвалку», у которых фазы обмотки состоят из катушечных полугрупп, соединенных так, чтобы в образовании каждого полюса участвовало q сторон катушек каждой фазы.

На рис. 39 дана схема однослойной секционной обмотки «вразвалку» двухполюсного электродвигателя.

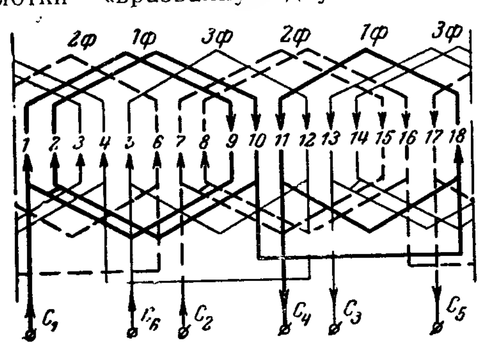


Рис. 39. Схема однослойной секционной обмотки «вразвалку». $z=18$; $2p=2$; $q=3$; $y_1=7$; $y_2=8$.

Статор имеет 18 пазов, число пазов на полюс и фазу $q=3$, число катушек в фазе 3, число катушек в обмотке 9. Каждая катушечная группа, состоящая из трех катушек, разделена на две катушечные полугруппы; одна имеет две катушки, другая — одну катушку. Соединены катушечные полугруппы так, чтобы в образовании полюса участвовало q сторон катушек каждой фазы. Данная обмотка имеет укороченный и разный шаг по пазам: $y_1=7$; $y_2=8$; диаметральный шаг такой обмотки был бы $y=9$. В связи с укорочением шага по пазам расход меди на лобовые части обмотки меньше, чем в однослойной, секционной, показанной на рис. 38, для такого же электродвигателя. Разные шаги по пазам, как и укорочение шага, в данной обмотке и других аналогичных ей не меняют свойств обмотки.

Здесь следует остановиться на понятии «фазная зона».

Участок статора, измеренный в электрических градусах, на котором расположены стороны катушек катушечной группы одной фазы и одного полюса, называют фазной зоной.

Для двухслойной обмотки шириной фазной зоны будет участок статора, также измеренный в электрических градусах, на котором расположены только верхние (или только нижние) стороны катушек катушечной группы одной фазы и одного полюса.

Трехфазные обмотки принято конструировать так, чтобы ширина фазной зоны составляла 60 *эл. град.* Для уяснения вычислим, например, ширину фазной зоны однослойной обмотки, приведенной на рис. 38. Так как два полюса любой обмотки соответствуют 360 *эл. град* и в однослойной обмотке на пару полюсов приходятся три катушечные группы (по одной на каждую фазу), то стороны трех катушечных групп данной обмотки, лежащих под одним полюсом, занимают 180 : 3 = = 60 *эл. град.*

Если число пазов на полюс и фазу выразим в электрических градусах, то получим ширину фазной зоны:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{360p}{2pm}=\frac{360}{2m}=\frac{360}{6}=60 \text{ эл. град.}$$

Однослойные обмотки, у которых фазные зоны заняты только сторонами катушек своей фазы, называются обмотками со сплошной фазной зоной; у них q сторон катушек каждой катушечной группы расположены в рядом лежащих пазах и ширина фазной зоны не выходит за пределы 60 *эл. град.* В противном случае обмотки называются обмотками с несплошной фазной зоной.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ВЫБОР ВИДА ОБМОТКИ. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. ПРИМЕНЕНИЕ СХЕМ ПРИ НАМОТКЕ

10. ВЫБОР ВИДА ОБМОТКИ

При ремонте электродвигателей следует стремиться к улучшению их электрических свойств и технических данных по сравнению с данными завода-изготовителя. В большинстве случаев возможность для этого имеется, особенно при ремонте электродвигателей старых типов.

Применение новых обмоточных проводов с более теплостойкой и более тонкой изоляцией и новых видов электроизоляционных материалов дает возможность повысить номинальную мощность машины даже в электродвигателях единой серии А и АО или же при сохранении прежней мощности повысить их надежность в работе.

При выборе вида обмотки рекомендуется руководствоваться следующими соображениями.

Двухслойные обмотки с укороченным шагом имеют ряд преимуществ по сравнению с однослойными обмотками. В двухслойных обмотках расход обмоточных проводов на 10—15% меньше, чем в однослойных, за счет меньшей длины лобовых частей, а при укорочении, равном 0,8 полюсного деления, форма кривой поля и э. д. с приближается к синусоиде, что улучшает электрические свойства электродвигателя, а также к. п. д. и cos φ в связи с меньшим активным и индуктивным сопротивлением обмотки. Двухслойные обмотки легко выполнимы при дробном *q*.

Значительное распространение имеют и однослойные обмотки, особенно в электродвигателях малых мощностей; объясняется это тем, что в однослойных обмотках коэффициент заполнения паза медью выше, чем в двухслойных, так как в двухслойных обмотках между нижними и верхними сторонами катушек прокладываются прокладки из электрокартона. Кроме того, при переходе на обмотку с укороченным шагом необходимо увеличивать число эффективных проводов в пазу, чтобы не допустить увеличения тока холостого хода, а все вместе может даже снизить мощность электродвигателя малых габаритов при замене однослойной обмотки двухслойной. Затраты труда при выполнении однослойной обмотки также ниже, чем при двухслойной обмотке.

При выборе вида обмотки определенную роль играет наличие требуемого сечения обмоточного провода. При больших диаметрах провода легче выполнить обмотку двухслойной,так как толщина катушки при этом вдвое меньше, чем в однослойной, что облегчает процесс гибки лобовых частей. При малых диаметрах проводов и необходимости выполнять обмотку в два или три параллельных провода выгоднее применить однослойную обмотку, позволяющую иметь более высокий коэффициент заполнения паза медью.

Вопрос выбора типа обмотки иногда решается, исходя из конструктивных особенностей данного электродвигателя. При малой высоте спинки статора и небольшом пространстве между подшипниковым щитом и торцом сердечника статора обмотку следует выполнять двухслойной, у которой лобовые части равномерно распределяются по окружности статора, почему они и имеют меньший вылет.

Что касается выбора однослойной обмотки, то с точки зрения электрических свойств электродвигателя катушечная (концентрическая) обмотка и однослойная секционная с диаметральным шагом равнозначны и изготовление их производится, за редким исключением, с применением шаблонов. Однако выполнение однослойной секционной обмотки проще и легче, поэтому в ремонтной практике катушечные (концентрические) обмотки реже встречаются. Катушечная (концентрическая) обмотка в основном применяется при намотке роторов электродвигателей небольших мощностей, а также при намотке статоров и роторов, имеющих полузакрытые пазы с небольшой величиной пазового шлица, через который провод не проходит. В таких случаях процесс намотки производится в протяжку.

Большинство однослойных секционных обмоток «вразвалку», даже при укороченном шаге, обладает такими же электрическими и магнитными свойствами, как и однослойные секционные обмотки, выполненные без укорочения шага. Это касается тех однослойных обмоток, которые, несмотря на укорочение шага, имеют сплошную фазную зону, занимающую, как и в обмотках с диаметральным шагом, 60 *эл. град**. Преимущество таких обмоток заключается в экономии меди и более равномерном распределении лобовых частей катушек по окружности статора. То же самое можно сказать и в отношении катушечных (концентрических) обмоток «вразвалку».

На рис. 40 в качестве примера приведена схема однослойной секционной обмотки «вразвалку» с несплошной фазной зоной. В этой обмотке q сторон кату-

* В некоторых литературных источниках однослойные обмотки с укороченным шагом и сплошной фазной зоной называют обмотками с укороченными катушками и диаметральным шагом.

шек катушечной группы каждой фазы расположены не в рядом лежащих пазах, и поэтому здесь фазная зона равна 80 *эл. град* вместо 60 *эл. град* у обмоток со сплошной фазной зоной.

Обмотки с несплошной фазной зоной и нечетным q дают несинусоидальное вращающееся поле, и поэтому их по возможности следует избегать.

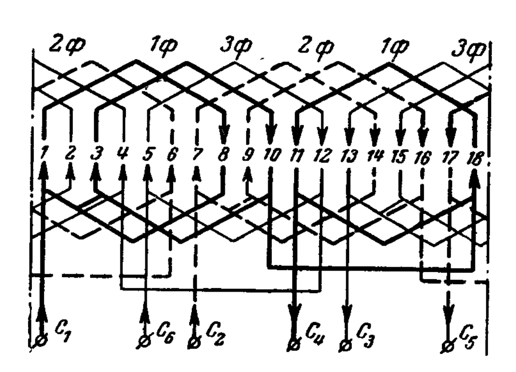


Рис. 40. Схема однослойной секционной обмотки «вразвалку».
$z=18$; $2p=2$; $q=3$; $y=7$.

При переходе на обмотку с укороченным шагом или наоборот следует откорректировать число эффективных витков в фазе или число эффективных проводов в пазу соответственно с изменившимся обмоточным коэффициентом.

Пример. У однослойной секционной обмотки статора электродвигателя с числом пазов $z=36$, числом полюсов $2p=4$, $q=3$, $y=9$, с числом эффективных проводов в пазу, равным 22, требуется определить число эффективных проводов в пазу при переходе на двухслойную обмотку с шагом $y=7$.

По табл. 2 определяется обмоточный коэффициент однослойной обмотки с диаметральным шагом $\beta'_y=1$ и $q=3$:

$$k'_w=0{,}96.$$

Определяется величина укорочения шага двухслойной обмотки:

$$\beta''_y=\frac{7}{9}=0{,}78.$$

Пользуясь табл. 2, определяют обмоточный коэффициент двухслойной обмотки, имеющей укорочение шага $\beta_y=0{,}78$ при $q=3$:

$$k''_w = k_{w1} - \left[\left(\frac{k_{w1}-k_{w2}}{80-75}\right)\cdot 2\right] = 0{,}913 - \left[\left(\frac{0{,}913-0{,}887}{5}\right)\cdot 2\right] =$$

$$= 0{,}913 - \frac{0{,}026}{5}\cdot 2 = 0{,}913 - 0{,}010 = 0{,}903.$$

Производится перерасчет числа эффективных проводов в пазу:

$$N''_п = N'_п \frac{k'_w}{k''_w} = 22\cdot\frac{0{,}96}{0{,}903} \approx 24.$$

11. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Наиболее распространенным способом изображения схем обмоток является развертка окружности статора или ротора на плоскость с изображением пазов вертикальными линиями с их нумерацией порядковыми числами от единицы до z. В однослойных обмотках паз обозначается одной сплошной линией, что означает и вложенную в паз сторону катушки. В двухслойных обмотках паз обозначается двумя рядом расположенными линиями. Левая линия обычно делается сплошной и обозначает одну сторону катушки верхней половины паза, а правая — пунктирной и обозначает сторону катушки, расположенную в нижней половине паза.

Исходными данными для составления схемы обмотки статора являются: число пазов статора z, число полюсов электродвигателя $2p$, число фаз m, число параллельных ветвей a, число катушек в обмотке $n_к$, число катушечных групп в обмотке $n_{к.г}$, число пазов между сторонами катушки $n_п$.

Порядок составления схем для различных видов обмоток статора дается ниже.

а) Однослойные секционные трехфазные обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу

Пример. Составить схему обмотки статора двухполюсного электродвигателя, у которого

$$z=12;\ 2p=2;\ a=1\ \text{(рис. 41)}.$$

Определяется число пазов на полюс и фазу:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{12}{2\cdot 3}=2.$$

Следовательно, катушечная группа состоит из двух катушек.

Определяется шаг обмотки по пазам:

$$y=\frac{z}{2p}=\frac{12}{2}=6.$$

Обмотку выполняют с диаметральным шагом, где левую сторону первой катушки располагают в 1-м пазу, а правую — в 7-м пазу; левую сторону второй катушки располагают во 2-м пазу, правую —

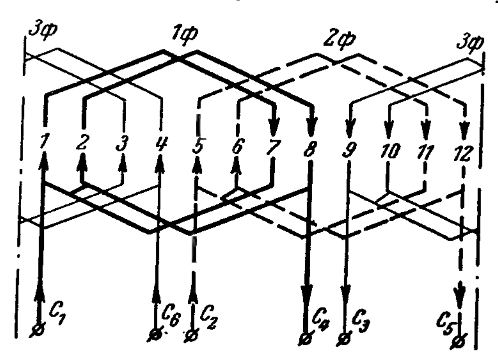


Рис. 41. Схема однослойной секционной обмотки.
$z=12$; $2p=2$; $q=2$; $y=6$.

в 8-м пазу, а обе катушки катушечной группы соединяют коротенькой линией, показывающей последовательность соединения катушек.

Подсчитывают число катушек и катушечных групп в обмотке:

$$n_{к}=\frac{z}{2}=\frac{12}{2}=6;$$

$$n_{к.г}=\frac{n_{к}}{q}=\frac{6}{2}=3,$$

откуда следует, что на одну фазу приходится по одной катушечной группе.

Определяют расстояние между началами фаз, т. е. $^2/_3\tau$:

$$\frac{2}{3}\tau=\frac{2}{3}\cdot\frac{z}{2p}=\frac{2\cdot 12}{3\cdot 2}=4.$$

Это означает, что если начало первой фазы расположить в 1-м пазу обмотки, то начало второй фазы должно находиться в 5-м пазу и начало третьей фазы в 9-м пазу.

Катушечную группу второй фазы укладывают в пазы: левые стороны катушек — в 5-й и 6-й пазы, а правые стороны — в 11-й и

12-й. Катушечную группу третьей фазы укладывают соответственно в 9-й и 10-й, 3-й и 4-й пазы. Здесь 3-й и 4-й пазы получились по методу круговой схемы: к номеру паза 9 прибавили шаг 6 и вычли $z=12$, откуда $(9+6)-12=3$, а к пазу 10 прибавили шаг 6, вычли 12 и получили 4-й паз. Концы фаз обозначают по ГОСТ: начало 1-й фазы — C_1, конец первой фазы — C_4, начало 2-й фазы — C_2, конец второй фазы — C_5, начало 3-й фазы — C_3, конец 3-й фазы — C_6 и проверяют расстояние между концами фаз, которое тоже должно равняться $^2/_3\,\tau$.

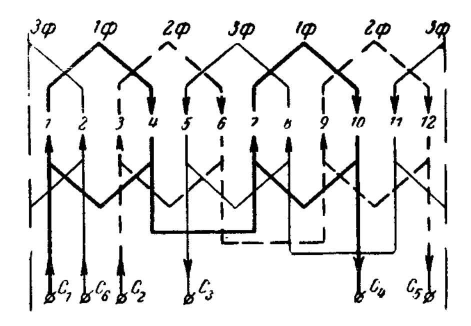


Рис. 42. Схема однослойной секционной обмотки.
$z=12$; $2p=4$; $q=1$; $y=3$.

Если ток входит в обмотку из начала 1-й и 2-й фазы (на схеме стрелки направлены вверх), а выходит из обмотки через начало 3-й фазы (на схеме стрелки направлены вниз), то после нанесения стрелок, показывающих направление тока в проиодах, вся обмотка разделится на две части, имеющие противоположную полярность и обозначающие два полюса.

Пример. Составить схему трехфазной обмотки статора электродвигателя, у которого $z=12$; $2p=4$, $a=1$ (рис. 42).

Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{12}{4\cdot 3}=1,$$

т. е. катушечная группа состоит из одной катушки.

Определяют шаг обмотки по пазам:

$$y=\frac{z}{2p}=\frac{12}{4}=3.$$

Подсчитывают число катушек и катушечных групп в обмотке:

$$n_{к}=\frac{z}{2}=\frac{12}{2}=6;$$

$$n_{к.г}=\frac{n_{к}}{q}=\frac{6}{1}=6.$$

Следовательно, на каждую фазу приходятся две катушечные группы, по одной катушке в каждой.

Размещают в пазах первую катушечную группу первой фазы: в 1-м пазу — левую сторону катушки, а в 4-м пазу — правую сторону катушки.

В однослойных секционных обмотках катушечные группы одной фазы отстоят друг от друга на два диаметральных шага, поэтому вторая катушечная группа будет занимать 7-й и 10-й пазы.

Определяют расстояние между началами фаз: так как

$$\frac{2}{3}\tau=\frac{2z}{3\cdot 2p}=\frac{z}{3p},$$

а

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{z}{2p\cdot 3}=\frac{z}{6p},$$

то

$$\frac{2}{3}\tau=2q.$$

Здесь $2q=2\cdot 1=2$.

Исходя из этого, начало 2-й фазы расположится в 3-м пазу, а начало 3-й фазы — в 5-м пазу.

Катушечные группы 2-й и 3-й фазы расположатся следующим образом: первая катушечная группа 2-й фазы будет занимать 3-й и

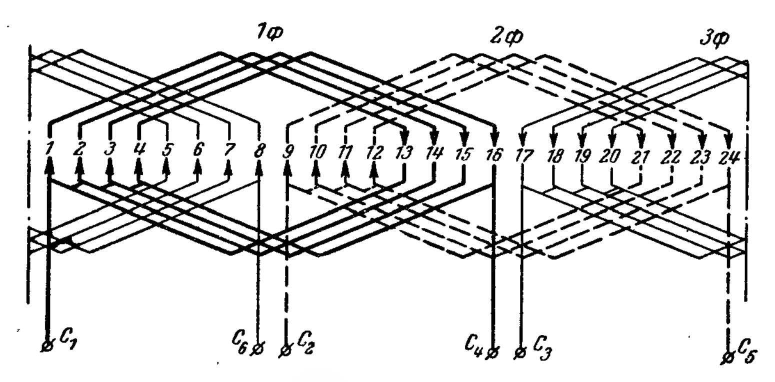


Рис. 43. Схема однослойной секционной обмотки.
$z=24$; $2p=2$; $q=4$; $y=12$.

6-й пазы, а вторая должна быть расположена от нее на два диаметральных шага, или занимать 9-й и 12-й пазы.

Первая катушечная группа 3-й фазы разместится в 5-м и 8-м пазах, а вторая разместится в 11-м и 2-м пазах; соединяют катушечные группы, где конец первой катушечной группы соединяется с началом второй в каждой фазе.

Выводы, показывающие начала и концы фаз, нумеруются по ГОСТ и по ним проверяют расстояние между концами фаз, которое должно равняться $2q$, а стрелками обозначают направление тока в проводах, проверив при этом, разделена ли обмотка на четыре части, представляющие собой четыре полюса. После проверки каждая катушечная группа отмечается соответствующим номером фазы.

На рис. 43 показана схема обмотки статора со следующими данными: $z=24$; $2p=2$; $q=4$; $y=12$. Порядок составления схемы такой

же, как в примере 1. Расстояние между началами фаз равно $2q=2\cdot4=8$, также и между концами фаз. Шаг обмотки по пазам диаметральный. В образовании полюса участвуют стороны катушечных групп всех трех фаз.

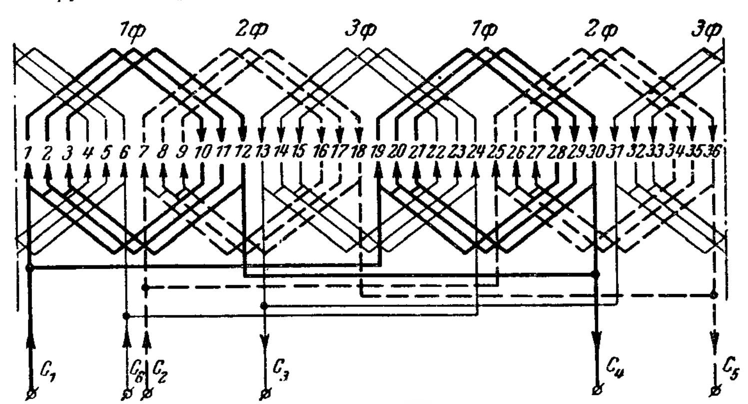


Рис. 44. Схема однослойной секционной обмотки.
$z=36$; $2p=4$; $q=3$; $y=9$; $a=2$.

Пример. Составить схему трехфазной обмотки статора. Дано: $z=36$; $2p=4$; $a=2$ (рис. 44).

Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{36}{4\cdot3}=3.$$

Определяют шаг обмотки по пазам:

$$y=\frac{z}{2p}=\frac{36}{4}=9.$$

Определяют число катушек и катушечных групп в обмотке:

$$n_{\text{к}}=\frac{z}{2}=\frac{36}{2}=18;$$

$$n_{\text{к.г}}=\frac{n_{\text{к}}}{q}=\frac{18}{3}=6.$$

Таким образом, на фазу приходятся $6:3=2$ катушечные группы, где каждая катушечная группа состоит из трех катушек.

Размещают в пазах 1-ю катушечную группу 1-й фазы, где левая сторона ее займет 1-й, 2-й и 3-й пазы, а правая сторона — 10-й, 11-й и 12-й пазы.

Начало 2-й катушечной группы 1-й фазы расположится на два диаметральных шага от начала первой катушечной группы, т. е.

в 19-м пазу; конец расположится в 28-м пазу; остальные две катушки левыми сторонами займут 20-й и 21-й пазы, а правыми — 29-й и 30-й пазы.

Начало 2-й фазы расположится от начала 1-й фазы на $2q=2\cdot3=6$, т. е. в 7-м пазу, начало 3-й фазы — в 13-м пазу. Левые стороны 1-й катушечной группы 2-й фазы займут 7-й, 8-й и 9-й пазы, правые — 16-й, 17-й и 18-й пазы. Левые стороны 1-й катушечной группы 3-й фазы расположатся в 13-м, 14-м и 15-м пазах, правые — в 22-м, 23-м и 24-м пазах.

Вторая катушечная группа 2-й фазы расположится на два диаметральных шага от 1-й катушечной группы своей фазы; левая сторона ее займет 25-й, 26-й и 27-й пазы, а правая — 34-й, 35-й и 36-й пазы. Вторая катушечная группа 3-й фазы левой стороной займет 31-й, 32-й и 33-й пазы, а правой стороной — 4-й, 5-й и 6-й пазы.

Соединяют катушки в каждой катушечной группе и фиксируют номера фаз на катушечных группах.

Соединяют катушечные группы каждой фазы в две параллельные ветви, где на одну параллельную ветвь приходится по одной катушечной группе. Начала 1-й и 2-й катушечных групп соединяют вместе, а общий вывод будет началом фазы. Концы 1-й и 2-й катушечных групп также соединяют вместе, и общий вывод будет концом фазы.

Аналогично производят соединение катушечных групп в две параллельные ветви во 2-й и 3-й фазах и буквенными индексами обозначают начала и концы фаз.

Стрелками обозначают направление токов в проводах и параллельных ветвях, проверив правильность расположения полюсов в обмотке. Каждый полюс должен быть образован сторонами катушечных групп всех трех фаз, а чередование полюсов должно быть С—Ю—С—Ю или Ю—С—Ю—С в зависимости от того, какое направление стрелок было принято за северный и южный полюсы.

б) Однослойные катушечные (концентрические) обмотки с целым q

Пример. Дано: $z=36$; $2p=4$; $a=1$. Требуется составить схему трехфазной обмотки (рис. 45).

Определяют число пазов, приходящееся на полюс и фазу:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{36}{4\cdot3}=3.$$

Определяют средний шаг обмотки по пазам:

$$y=\frac{z}{2p}=\frac{36}{4}=9.$$

Определяют число катушек и катушечных групп в обмотке:

$$n_к=\frac{z}{2}=\frac{36}{2}=18;$$

$$n_{к.г}=\frac{n_к}{q}=\frac{18}{3}=6.$$

Таким образом, в каждой фазе будет по две катушечные группы, а в каждой катушечной группе — по три катушки разной ширины (обмотка концентрическая).

Берется катушечная группа, где левую сторону самой узкой катушки помещают в 3-й паз, а правую — в паз, расположенный от 3-го паза на расстоянии $2q$, т. е. в 10-й паз; тогда следующая за нею

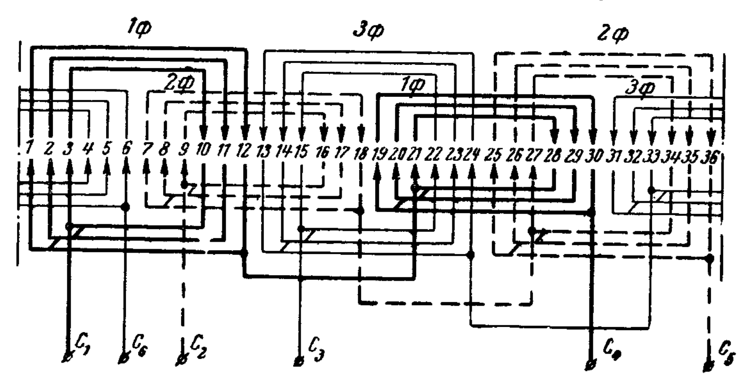


Рис. 45. Схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки.

$z=36$; $2p=4$; $q=3$; $y_1=7$; $y_2=9$; $y_3=11$.

в порядке намотки вторая катушка должна быть помещена во 2-й и 11-й пазы, а третья катушка — в 1-й и 12-й пазы; при этом средний шаг получится равным

$$y_{ср}=(7+9+11):3=9.$$

Вторую катушечную группу первой фазы укладывают так, чтобы левая сторона самой узкой катушки разместилась в пазу, отстоящем от начала 1-й катушечной группы на два диаметральных шага, т. е. в 21-м пазу. Вторая сторона этой катушки разместится через $2q$ пазов, т. е. в 28-м пазу; левые стороны остальных двух катушек займут пазы 20-й и 19-й, а правые стороны — 29-й и 30-й.

Начала 2-й и 3-й фаз располагают друг от друга на расстоянии $2q$, т. е. на 6 пазов, руководствуясь при этом теми же правилами, что и при укладке 1-й фазы.

Наносят соединительные линии между катушками катушечных групп во всех трех фазах, соединяют конец первой катушечной группы с началом второй катушечной группы и буквенными индексами обозначают начала и концы фаз, а направление токов в проводах обмотки — стрелками, одновременно проверив правильность чередования полюсов.

в) Однослойные секционные трехфазные обмотки «вразвалку» с целым q

Пример. Составить схему обмотки статора двухполюсного электродвигателя.

Дано: $z=12$; $2p=2$; $a=1$ (рис. 46).

Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{12}{2\cdot 3}=2.$$

Определяют число катушек и катушечных групп в обмотке:

$$n_{к}=\frac{z}{2}=\frac{12}{2}=6;$$

$$n_{к.г}=\frac{n_{к}}{q}=\frac{6}{2}=3.$$

На каждую фазу приходится по одной катушечной группе, состоящей из двух катушечных полугрупп, где последняя состоит из одной катушки.

Определяют шаг обмотки по пазам, проверив приемлемость для данной обмотки расстояния между сторонами катушек, равного $2q=2\cdot 2=4$; тогда стороны первой катушки 1-й фазы займут 1-й и 6-й пазы. Для проверки правильности принятого шага можно пользоваться практическим способом.

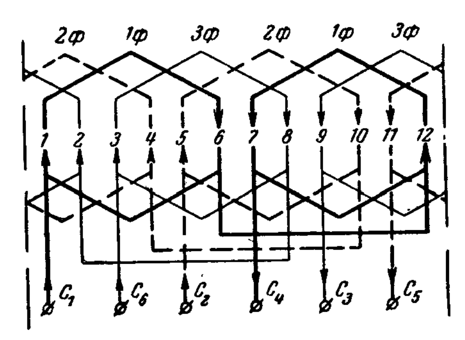


Рис. 46. Схема однослойной секционной обмотки «вразвалку». $z=12$; $2p=2$; $q=2$; $y=5$.

Наносят на бумагу ряд вертикальных линий, обозначающих пазы, и проставляют номера пазов от единицы до числа, превышающего величину шага обмотки на несколько пазов. Размещают катушечную полугруппу в пазы согласно подсчитанному или заданному шагу, а в свободные пазы между сторонами катушечной полугруппы размещают катушечные полугруппы других фаз так, чтобы лобовые части рядом лежащих катушечных полугрупп выходили в противоположные стороны. Поскольку лобовые части левой стороны катушечной полугруппы 1-й фазы направлены вправо, лобовые части рядом лежащей катушечной полугруппы другой фазы должны быть направлены влево, а следующей катушечной полугруппы — вправо и т. д. При правильном выборе шага должна получиться полная симметрия в расположении лобовых частей, а все пазы между сторонами катушечной полугруппы, принятой за первую, должны быть заняты катушечными полугруппами других фаз (рис. 47).

Из такого построения (рис. 47,*б*) видно, что шаги 1—6 определены правильно.

Вторую катушечную полугруппу 1-й фазы располагают так, чтобы левая сторона ее разместилась на расстоянии диаметрального шага от начала 1-й катушечной полугруппы, а правая в паз по шагу

обмотки, т. е. в пазы 7-й и 12-й. Вычертив эту катушечную полугруппу, увидим, что левая ее сторона расположится рядом с правой стороной 1-й катушечной полугруппы. Такое расположение является общим для всех обмоток «вразвалку», чем можно воспользоваться при составлении схем обмоток.

Соединяют конец 1-й катушечной полугруппы с концом 2-й катушечной полугруппы.

Определяют начала 2-й и 3-й фаз. Все начала фаз и в обмотке этого вида будут располагаться друг от друга на расстоянии $2q$.

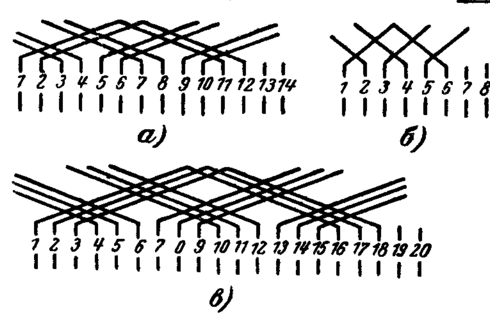


Рис. 47. Практический способ проверки правильности взятого шага по пазам в однослойной секционной обмотке «вразвалку».

Если начало 1-й фазы расположить в 1-м пазу, то начало 2-й фазы будет выходить из 5-го паза, а начало 3-й фазы — из 9-го паза.

Размещают катушечные полугруппы 2-й и 3-й фаз в соответствующих пазах аналогично размещению 1-й фазы и соединяют их в фазах.

На катушечных полугруппах фиксируют номера фаз и буквами обозначают выводные концы, указывают стрелками направления токов в проводах и проверяют правильность составленной схемы по полярности полюсов.

Пример. Составить схему однослойной секционной обмотки «вразвалку».

Дано: $z=36$; $2p=4$; $a=1$ (рис. 48).

Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{36}{4\cdot 3}=3.$$

Определяют число катушек и катушечных групп в обмотке:

$$n_{\text{к}}=\frac{z}{2}=\frac{36}{2}=18;$$

$$n_{\text{к.г}}=\frac{18}{3}=6.$$

В каждой фазе катушечных групп будет $6:3=2$.

Определяют число катушек в катушечной полугруппе.

Так как q — нечетное число, катушечные полугруппы должны состоять из различного количества катушек: первая полугруппа каждой катушечной группы должна иметь $(q+1):2$, а вторая полугруппа $(q-1):2$ катушек.

Подсчитывают число катушек в каждой полугруппе при $q=3$. В первой полугруппе $(3+1):2=2$ катушки, а во второй $(3-1):2=$

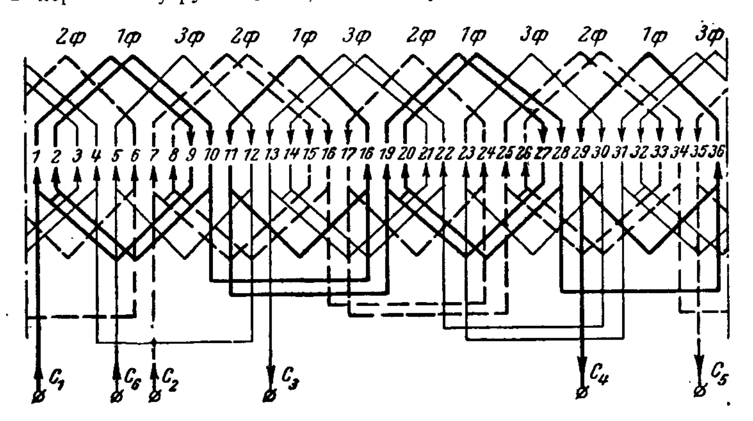


Рис. 48. Схема однослойной секционной обмотки «вразвалку». $z=36$; $2p=4$; $q=3$; $y_1=7$; $y_2=8$.

$=1$ катушка. Таким образом, в фазе будут полугруппы с двумя катушками 2 и с одной катушкой 2.

Первую катушечную полугруппу, состоящую из двух катушек, располагают в пазах, где 1-й и 2-й пазы займет левая сторона, а правая сторона через $2q$, или 6 пазов, займет 9-й и 10-й пазы. Следующая полугруппа первой катушечной группы, состоящая из одной катушки, левой стороной займет 11-й паз, а правая сторона через $2q$ займет 18-й паз.

Вторая катушечная группа займет: полугруппа с двумя катушками левой стороной — 19-й и 20-й пазы, правой — 27-й и 28-й пазы и полугруппа с одной катушкой: левой стороной — 29-й, а правой — 36-й пазы. Соединение полугрупп производят по правилу «конец с концом, начало с началом», предварительно соединив последовательно катушки в полугруппах.

Начала фаз располагают через $2q$, равное 6 пазам: в 7-м пазу — начало 2-й фазы, в 13-м пазу — начало 3-й фазы, а соединения производят, как в 1-й фазе.

Обозначим цифрами номера фаз, буквами — начала и концы фаз, разметим стрелками направление тока в проводах катушек и проверим полярность и чередование полюсов.

Рассматривая составленную схему, мы увидим, что шаг по пазам обмотка имеет неодинаковый: в одних катушках $y=7$, в других $y=8$, однако принцип построения схемы от этого не нарушен.

г) Двухслойные трехфазные обмотки с целым q

Пример. Составить схему обмотки статора двухполюсного электродвигателя (рис. 49).

Дано: $z=12$; $2p=2$; $a=1$.

Определяем число пазов на полюс и фазу:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{12}{2\cdot 3}=2.$$

Определяем диаметральный шаг:

$$y_{д}=\frac{z}{2p}=\frac{12}{2}=6.$$

Берем укороченный шаг $y_{у}=0{,}8\ y_{д}=0{,}8\cdot 6\approx 5$.

Определяем число катушек и число катушечных групп в обмотке:

$$n_{к}=z=12;$$

$$n_{к.г}=\frac{n_{к}}{q}=\frac{12}{2}=6.$$

На фазу приходятся две катушечные группы, в катушечной группе две катушки.

Размещаем левую сторону первой катушечной группы в верхнюю часть 1-го и 2-го пазов, правую сторону — в нижнюю часть

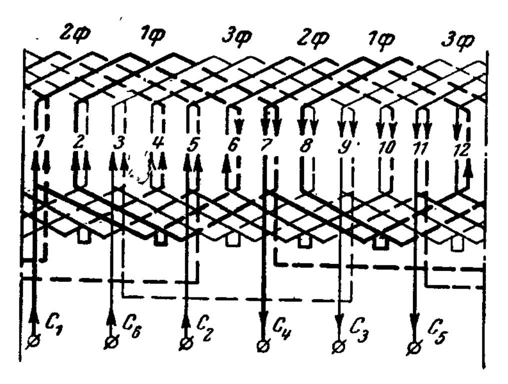


Рис. 49. Схема двухслойной обмотки.
$z=12$; $2p=2$; $q=2$; $y=5$.

6-го и 7-го пазов. Начало второй катушечной группы 1-й фазы располагаем от начала первой катушечной группы на расстоянии диаметрального шага, т. е. в 7-м пазу. Вторая катушечная группа займет пазы: левой стороной — верхнюю часть 7-го и 8-го пазов, правой стороной — нижнюю часть 12-го и 1-го пазов.

Соединяем катушки последовательно, катушечные группы — по правилу: «конец первой катушечной группы с концом второй кату-

шечной группы, начало второй катушечной группы с началом третьей катушечной группы».

Размещаем начала 2-й и 3-й фаз: начало 2-й фазы должно находиться на расстоянии $2q$ от начала 1-й фазы и занимать 5-й паз; начало 3-й фазы должно отстоять от начала 2-й фазы также на $2q$ и занимать 9-й паз. Размещаем катушечные группы 2-й и 3-й фаз и делаем соединения катушечных групп.

Обозначим номера фаз, начала и концы фаз, разметим направление токов в проводах катушек стрелками и проверим полярность полюсов.

Рис. 50. Схема двухслойной обмотки. $z=12$; $2p=4$; $q=1$; $y=2$.

Рассматривая схему обмотки, заметим, что в 6-м и 12-м пазах имеются встречные токи. Это не должно нас смущать, так как в двухслойных обмотках при укорочении шага на один паз будут встречные токи в одном пазу на каждый полюс; при укорочении на два паза встречные токи будут в двух пазах на каждый полюс и т. д.

Пример. Проверить правильность построения обмотки статора вычислением некоторых обмоточных данных (рис. 50).

Дано: $z=12$; $2p=4$; $a=1$; $y=2$.

Число пазов на полюс и фазу

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{12}{4\cdot 3}=1.$$

Число катушек в фазе равно

$$\frac{n_к}{m}=\frac{12}{3}=4.$$

Число катушечных групп в фазе равно

$$\frac{n_к}{mq}=\frac{12}{3\cdot 1}=4.$$

Расстояние между началами фаз $2q=2\cdot 1=2$.

Расстояние между началами катушечных групп в фазе — один диаметральный шаг, равный 3.

Пример. Составить схему обмотки статора четырехполюсного электродвигателя (рис. 51).

Дано: $z=24$; $2p=4$; $a=4$, где a — число параллельных ветвей.

Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{24}{4\cdot 3}=2.$$

Определяют число катушечных групп в обмотке:

$$n_{к.г} = \frac{n_к}{q} = \frac{24}{2} = 12.$$

На каждую фазу приходится по четыре катушечные группы, в каждой катушечной группе две катушки.

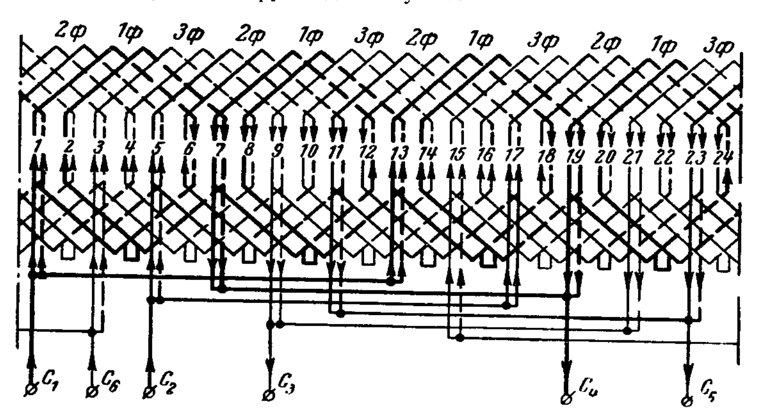


Рис. 51. Схема двухслойной обмотки.
$z=24$; $2p=4$; $q=2$; $y=5$; $a=4$.

Определяют диаметральный шаг обмотки:

$$y_д = \frac{z}{2p} = \frac{24}{4} = 6.$$

Принимается укорочение шага на один паз, где $y=5$.

Левую сторону первой катушечной группы 1-й фазы укладывают в верхнюю часть 1-го и 2-го пазов, а правую сторону — в нижнюю часть 6-го и 7-го пазов.

Определяют пазы остальных катушечных групп 1-й фазы, начало которых должно отстоять от начала предыдущей на диаметральный шаг, эта вторая катушечная группа левой стороной займет верхнюю часть 7-го и 8-го пазов, а правой — нижнюю часть 12-го и 13-го пазов; третья катушечная группа левой стороной займет верхнюю часть 13-го и 14-го пазов, а правой — нижнюю часть 18-го и 19-го пазов; четвертая катушечная группа левой стороной займет верхнюю часть 19-го и 20-го пазов, а правой — нижнюю часть 24-го и 1-го пазов. Катушки катушечных групп соединяются, а фазы обозначаются соответствующим индексом. Соединений между катушечными группами не делается из-за наличия в обмотке четырех параллельных ветвей.

Определяют начала 2-й и 3-й фаз, расположенные через $2q$ друг от друга. Начало 2-й фазы выйдет из 5-го паза, а начало 3-й фазы — из 9-го паза.

Катушечные группы 2-й и 3-й фаз располагаются аналогично размещению их в 1-й фазе, а на катушечных группах отмечают: цифрами — номера фаз, буквами C_1, C_2, C_3 — их начала, а стрелками — направление токов в выводных концах.

Для образования четырех параллельных ветвей следует начало первой катушечной группы соединить с началом 3-й, концом 2-й и концом 4-й катушечных групп, а общий выводной провод будет началом фазы; конец первой катушечной группы соединить с концом 3-й, началом 2-й и началом 4-й катушечных групп, а общий выводной провод будет концом фазы.

Обозначив концы фаз буквами C_4, C_5, C_6, проверяют правильность направления токов в проводах катушечных групп, соединительных и выводных проводах, полярность и чередование полюсов.

Рассматривая направление токов в пазах, можно видеть, что в 6-м, 12-м, 18-м и 24-м пазах имеются встречные токи из-за укорочения шага обмотки на один паз, и поэтому на один полюс падает один паз со встречными токами.

д) Двухслойные и однослойные трехфазные обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу, дробное q

Дробное число пазов на полюс и фазу означает, что в данной обмотке число катушек в катушечных группах неодинаково, т. е. в одних катушечных группах число катушек на одну больше, чем в других.

Дробное значение числа пазов на полюс и фазу обозначается индексом q и представляется в виде дроби (правильной):

$$q = b + \frac{c}{d},$$

где b — целое число;

c — числитель дроби;

d — знаменатель дроби.

Число катушек в каждой фазе при двухслойной обмотке равно $2pq$, а при однослойной pq.

При дробном q часть катушечных групп выполняется из числа катушек, равного $(b+1)$, а часть — из b катушек.

При составлении схем с дробным q следует из соседних катушек, равном $(bd+c)$, образовать d катушечных групп, из которых c катушечных групп с числом катушек в группе, равным $(b+1)$, и $(d-c)$ катушечных групп с числом катушек в группе, равным b.

Пример. Составить схему двухслойной обмотки статора, у которого $z=30$; $2p=4$; $a=1$.

Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{30}{4 \cdot 3} = 2\frac{1}{2} \text{ (рис. 52)},$$

где $b=2$; $c=1$; $d=2$.

Здесь часть катушечных групп состоит из $(b+1)=2+1=3$ катушек, а часть из $b=2$ катушек.

Схему следует составить из $(bd+c)=2 \cdot 2+1=5$ соседних катушек и образовать $d=2$ катушечные группы, где $c=1$ катушечная

группа будет состоять из $(b+1)=2+1=3$ катушек и $(d-c)=2-1=$ $=1$ катушечная группа будет состоять из $b=2$ катушек.

Число катушек в фазе будет равно $2pq=4\cdot 2\frac{1}{2}=10$, а число чередований катушечных групп в обмотке равно

$$\frac{2pm}{d}=\frac{4\cdot 3}{2}=6.$$

Таким образом, в цифровом выражении схема выглядит так: (3—2) (3—2) (3—2) (3—2) (3—2) (3—2), где цифры в скобках озна-

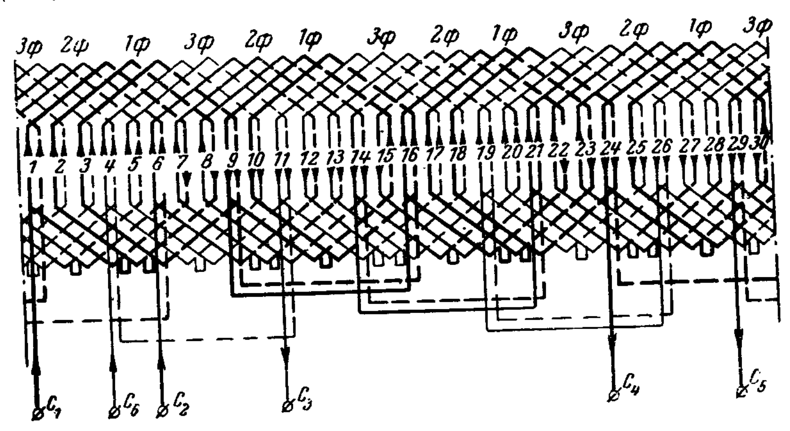


Рис. 52. Схема двухслойной обмотки.
$z=30$; $2p=4$; $q=2^1/_2$; $y=6$.

чают число катушек в катушечных группах, а скобки отделяют чередования (см. приложение 10 и рис. 52).

Определяют шаг по пазам:

$$y=\frac{z}{2p}=\frac{30}{4}=7,5.$$

Принимается укороченный шаг $y=6$.

Если величина дробной части q равна $^1/_2$, то расстоянии между началами фаз будут равны $2q=2\cdot 2\frac{1}{2}=5$ и начало второй фазы будет в 6-м, а начало 3-й в 11-м пазу. Если произведение $2q$ не будет равно целому числу, его следует округлить до ближайшего целого числа, что и принимается за расстояние между началами фаз.

Для обмоток с дробным q диаметральный шаг обмотки также будет дробным, поэтому место катушечных групп в каждой фазе определяется в процессе построения схемы обмотки. Если одни ка-

тушечные группы состоят из трех катушек, а другие из двух катушек, то при одинаковом числе тех и других в фазе построение первой катушечной группы можно начать с любой, чередуя их при дальнейшем построении схемы в каждой фазе и обмотке в целом (см. приложение 10).

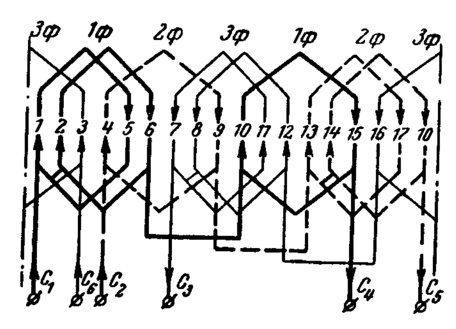


Рис. 53. Схема однослойной секционной обмотки.

$z=18$; $2p=4$; $q=1^1/_2$; $y_1=4$; $y_2=5$.

Разместив первые катушечные группы всех фаз, каждая из которых состоит из трех катушек, укладывают следующую катушечную группу 1-й фазы, состоящую из двух катушек, в 9-й и 10-й пазы. Дальнейшее построение обмотки упрощается тем, что чередование катушечных групп фаз уже определилось. Зная чередование катушечных групп фаз и чередование катушечных групп с двумя и тремя катушками в фазе, легко построить схему обмотки в целом, так как она ничем не отличается от построения обычных схем двухслойных обмоток.

Пример. Составить схему однослойной секционной обмотки четырехполюсного электродвигателя.

Дано: $z=18$; $2p=4$; $a=1$ (рис. 53).

Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{18}{4\cdot 3}=1\frac{1}{2}=b+\frac{c}{d},$$

где $b=1$; $c=1$; $d=2$.

При однослойной обмотке число катушек в фазе равно $pq=$ $=2\cdot 1\frac{1}{2}=3$.

Часть катушечных групп будет состоять из $(b+1)=1+1=2$ катушек, а часть из $b=1$ катушки.

Из соседних катушек $(bd+c)=1\cdot 2+1=3$ образуют $d=2$ катушечные группы, из которых $c=1$ катушечная группа состоит из $(b+1)=1+1=2$ катушек и $(d-c)=2-1=1$ катушечная группа состоит из $b=1$ катушки.

Число чередований катушечных групп в обмотке равно

$$\frac{pm}{d}=\frac{2\cdot 3}{2}=3.$$

В цифровом выражении схема обмотки выразится следующими данными: (2—1) (2—1) (2—1).

Определяют шаг обмотки по пазам:

$$y=\frac{z}{2p}=\frac{18}{4}=4,5.$$

Для катушечной группы из двух секций шаг $y_1=4$, а для катушечной группы из одной секции $y_2=5$.

Начала фаз располагают на расстоянии $2q=2\cdot 1\frac{1}{2}=3$ паза, значит начало 2-й фазы будет в 4-м, а начало 3-й фазы — в 7-м пазу.

Первые катушечные группы фаз располагают в пазах согласно принятым шагам, начала вторых катушечных групп фаз — на расстоянии двух диаметральных шагов от начала первых катушечных групп, т. е. $2\cdot 4{,}5=9$ пазов.

Дальнейшее построение схемы обмотки ничем не отличается от построения схем однослойных секционных обмоток.

Из приведенных примеров построения схем можно заключить следующее.

Во всех обмотках расстояние между началами фаз равно $2q$. В обмотках, имеющих дробное q, произведение $2q$ может быть не целым числом. В этих случаях за $2q$ принимается ближайшее целое число.

В однослойных секционных обмотках с целым q расстояние между началами двух соседних катушечных групп одной и той же фазы равно двойному диаметральному шагу, а в двухслойных обмотках с целым q — только диаметральному шагу.

В однослойных секционных обмотках «вразвалку» с целым q и одинаковым шагом по пазам расстояние между началами двух соседних катушечных полугрупп одной и той же фазы равно диаметральному шагу.

В однослойных секционных и катушечных (концентрических) обмотках, включая обмотки «вразвалку», между сторонами катушек каждой катушечной группы располагается $2q$ сторон катушек других фаз. Исключением являются обмотки с дробным q и некоторые однослойные секционные обмотки «вразвалку», у которых стороны катушечных групп размещены не в рядом лежащих пазах, а вперемежку со сторонами катушечных групп других фаз (см. рис. 40).

В обмотках с дробным q, имеющих дробь $1/2$, отпадает необходимость подсчитывать, сколько будет катушечных групп с числом катушек, равным b, и сколько будет катушечных групп с числом катушек, равным $b+1$. Во всех обмотках, имеющих дробное q с дробью, равной $1/2$, числа катушечных групп с меньшим и бо́льшим количеством катушек распределяются поровну, и поэтому, зная число катушек в фазе, легко подсчитать, сколько будет больших и малых катушечных групп.

12. ПРИМЕНЕНИЕ СХЕМ ПРИ НАМОТКЕ ОБМОТОК

Много разновидностей обмоток электрических машин имеется, поэтому даже опытный обмотчик не всегда запоминает построения той или иной схемы и перед началом намотки обычно вычерчивает схему для пользования. Наличие готовых схем обмоток дает возмож-

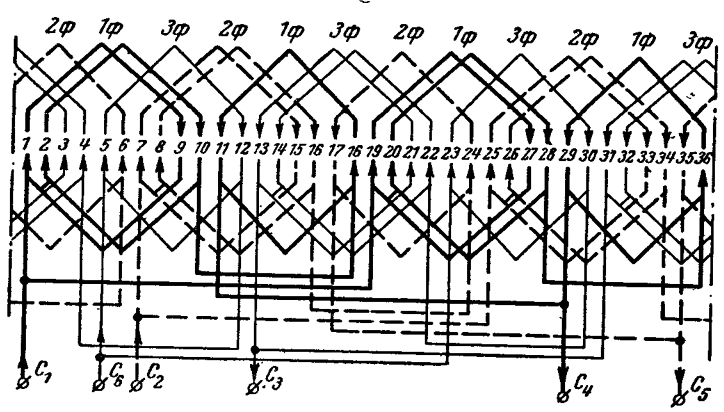


Рис. 54. Схема однослойной секционной обмотки «вразвалку». $z=36$; $2p=4$; $q=3$; $y_1=7$; $y_2=8$; $a=2$.

ность более квалифицированно и осмысленно выполнять намотку и повышает производительность труда, так как при работе обмотчик, посмотрев схему, сразу видит место расположения начал фаз, шаг обмотки, количество катушек в катушечной группе, расположение их, наличие параллельных ветвей и место расположения концов фаз. Опытному обмотчику достаточно взглянуть на схему обмотки перед работой, а начинающим и малоопытным обмотчикам полезно пользоваться схемой во время выполнения работы.

В целях изучения схем обмоток приводятся еще некоторые из них.

На рис. 54 приведена схема однослойной секционной обмотки «вразвалку», у которой число пазов $z=36$, число полюсов $2p=4$, число параллельных ветвей $a=2$; число катушек в катушечной группе 3. Эта обмотка состоит из катушечных полугрупп с одной и двумя секциями, которые, располагаясь в фазе рядом, образу-

ют q сторон, участвующих в создании полюса, что является характерным для обмоток «вразвалку». Между сторонами катушечной полугруппы любой фазы размещено $2q$ сторон катушек других фаз. Поэтому и получается разный шаг по пазам: в полугруппах с одной секцией $y_1=7$, а с двумя секциями $y_2=8$. В каждую параллельную ветвь входят одна полугруппа с двумя секция-

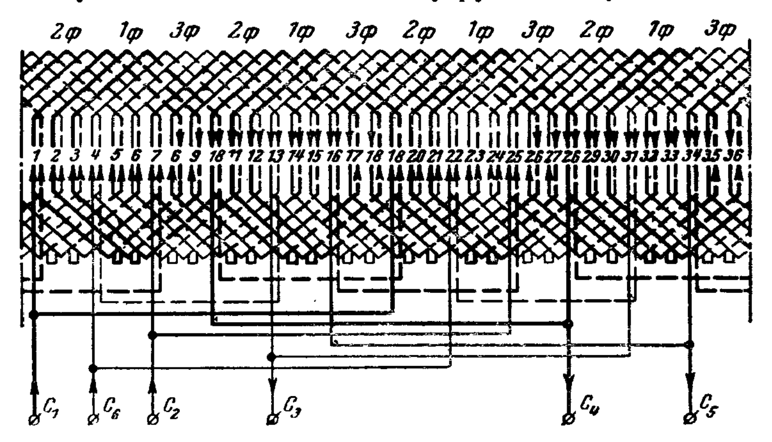


Рис. 55. Схема двухслойной обмотки.
$z=36$; $2p=4$; $q=3$; $y=7$; $a=2$.

ми и одна с одной секцией. Обмотка выполнена так, что каждая фаза начинается с полугруппы с двумя секциями. Можно составить обмотку и так, чтобы каждая фаза начиналась с полугруппы с одной секцией, так как структура обмотки от этого не изменится.

На рис. 55 приведена схема двухслойной обмотки с числом пазов $z=36$, числом полюсов $2p=4$, числом параллельных ветвей $a=2$. Укорочение шага здесь принято на два паза, поэтому на один полюс приходятся два паза со встречными токами (8-й, 9-й, 17-й, 18-й, 26-й, 27-й, 35-й, 36-й пазы), которые расположены симметрично (через девять пазов), что говорит о правильности составленной схемы. Следует иметь в виду, что расположение пазов со встречными токами в проводах, так же как и обозначение полярности полюсов, является действительным лишь для какого-то мгновения времени, так как по мере движения вращающегося магнитного

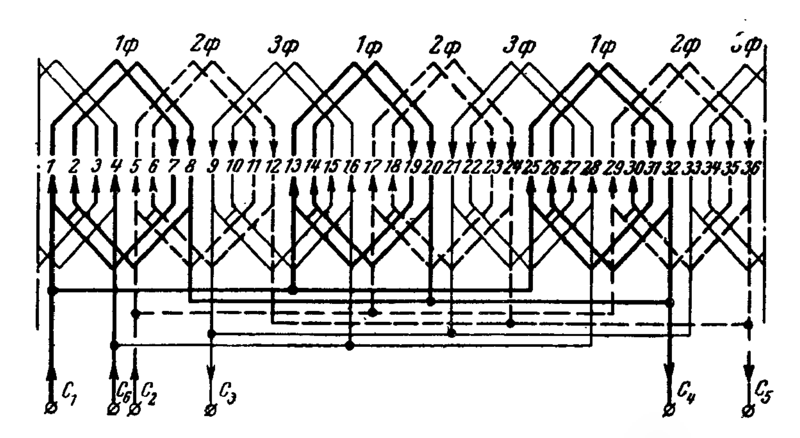


Рис. 56. Схема однослойной секционной обмотки.
$z=36$; $2p=6$; $q=2$; $y=6$; $a=3$.

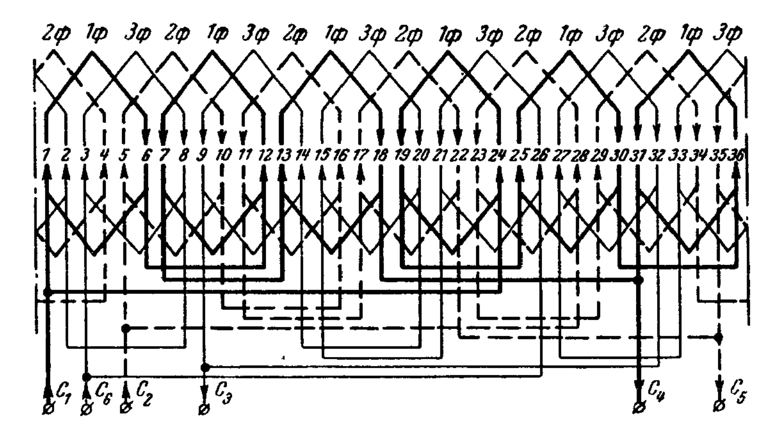


Рис. 57. Схема однослойной секционной обмотки «вразвалку».
$z=36$; $2p=6$; $q=2$; $y=5$; $a=2$.

поля по окружности расточки статора перемещаются и полюсы, и встречные токи в проводах обмотки.

На рис. 56 приведена схема однослойной секционной обмотки электродвигателя с числом пазов $z=36$, числом полюсов $2p=6$, числом параллельных ветвей $a=3$, числом пазов на полюс и фазу $q=2$ и диаметральным шагом обмотки, равным 6 ($y=6$). Каждая фаза имеет три катушечные группы с двумя секциями, а в параллельной ветви — одну с двумя секциями.

На рис. 57 приведена схема однослойной секционной обмотки «вразвалку», у которой число пазов $z=36$, число полюсов $2p=6$, число параллельных ветвей $a=2$, число пазов на полюс и фазу $q=2$ и число катушек в катушечной полугруппе равно 1. В параллельную ветвь входят три катушечные полугруппы. Данную обмотку можно выполнить без параллельных ветвей, с двумя параллельными ветвями, с тремя и шестью параллельными ветвями. При образовании параллельных ветвей необходимо, чтобы каждая параллельная ветвь имела одинаковое число катушечных групп или полугрупп и чтобы общее число катушек в каждой параллельной ветви было одинаковым.

ГЛАВА ПЯТАЯ

КОНСТРУИРОВАНИЕ ОБМОТОК СТАТОРА АСИНХРОННЫХ ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ВИДЫ ОБМОТОК

13. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОБМОТОК СТАТОРА АСИНХРОННЫХ ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

При конструировании обмоток статора асинхронных однофазных электродвигателей пользуются теми же основными принципами, что и при конструировании обмоток асинхронных трехфазных электродвигателей.

Число катушек в катушечной группе, равное числу пазов на полюс и фазу, q определяется по известной формуле:

$$q=\frac{z}{2pm}.$$

Однако при подсчете q для однофазных обмоток берут число пазов не всего статора, а то количество, которое фактически занимает данная обмотка (фаза). В однофазных двигателях с пусковыми элементами главная (рабочая) обмотка обычно занимает $^2/_3$, а пусковая $^1/_3$ общего числа пазов статора. Такое распределение пазов между обмотками позволяет устранить третью гармонику в кривой н. с. главной обмотки и экономически целесообразно.

Обозначив число пазов, приходящееся на рабочую обмотку, z_A, а число пазов, приходящееся на пусковую обмотку, z_B, получим формулы:

для главной (рабочей) обмотки

$$q_A = \frac{z_A}{2pm} = \frac{z_A}{2p \cdot 1} = \frac{z_A}{2p}; \qquad (10)$$

для пусковой обмотки

$$q_B = \frac{z_B}{2pm} = \frac{z_B}{2p \cdot 1} = \frac{z_B}{2p}, \qquad (11)$$

где q_A — число пазов на полюс рабочей обмотки;
q_B — число пазов на полюс пусковой обмотки.

В конденсаторных электродвигателях главная (рабочая) и вспомогательная обмотки занимают по половине всех пазов статора:

$$z_A = z_B = \frac{z}{2},$$

поэтому для этих обмоток $q_A = q_B$ (здесь q_B — число пазов на полюс вспомогательной обмотки).

Если при подсчете q_A и q_B обмоток конденсаторного электродвигателя брать не полное число пазов статора, а фактически занимаемое каждой в отдельности обмоткой, то можно пользоваться формулами (10) и (11), несмотря на то, что для конденсаторных электродвигателей число фаз $m=2$.

Шаг по пазам однофазных обмоток определяется, так же как и для трехфазных, по формуле

$$y = \frac{z}{2p},$$

где z — число пазов статора.

Шаг по пазам берут, как правило, укороченным. Так как однофазные и двухфазные обмотки в отличие от трехфазных могут создавать относительно сильную третью гармонику поля, которая может вызвать значительное искажение кривой вращающего момента, затрудняющее пуск электродвигателя, то для уничтожения третьей гармоники и ее последствий обычно однофазные и двухфазные обмотки выполняют с шагом, равным $^2/_3$ диаметрального.

В двухслойных обмотках шаг по пазам для рабочей и пусковой или вспомогательной обмоток берется одинаковым, а в однослойных обмотках шаг рабочей и пусковой обмоток может быть разным.

За начала главной и вспомогательной обмоток берут выводы катушек, выходящих из пазов, расположенных по окружности статора на 90 *эл. град*, т. е. на половину полюсного деления, чем и осуществляется требуемый сдвиг обмоток в пространстве. У некоторых однофазных электродвигателей сдвиг между главной и вспомогательной обмотками может быть немного больше 90 *эл. град*, что объясняется невозможностью осуществить сдвиг обмоток на 90 *эл. град* при заданных числах полюсов, пазов и виде обмотки. Начало рабочей обмотки обозначают C_1, конец — C_2, начало пусковой или вспомогательной обмотки — $П_1$, конец — $П_2$.

Особенностью однофазной (рабочей) обмотки является то, что ее фазные зоны в 2 раза шире, чем трехфазной обмотки (120 *эл. град* под каждым полюсом).

В конденсаторных электродвигателях, которые по существу являются двухфазными, фазная зона как рабочей, так и вспомогательной обмоток в $1^1/_2$ раза шире фазной зоны трехфазных обмоток и равна 90 *эл. град*.

В остальном схемы однофазных обмоток ничем существенным не отличаются от схем трехфазных обмоток. Соединение катушечных групп в однофазных обмотках «вразвалку» и двухслойных производится по общему правилу построения трехфазных обмоток. В схемах комбинированных однослойных обмоток катушечные группы соединяют между собой так, чтобы получилось требуемое число полюсов при одинаковом по возможности числе сторон катушек, принимающих участие в образовании каждого полюса. При соединении катушечных групп в параллельные ветви необходимо придерживаться всех требований, которые были изложены для трехфазных обмоток.

Особенностью пусковых обмоток однофазных электродвигателей со встроенным пусковым сопротивлением является то, что каждая катушка имеет некоторое число витков, намотанных встречно (бифилярно) для получения бифилярной катушки. Наличие бифилярных катушек уменьшает общее число эффективных витков

(или эффективных проводов) в обмотке, уменьшает величину индуктивного сопротивления, оставляя без изменения величину активного сопротивления. Если, например, в катушке всего витков 116, а встречно намотано 18, то число эффективных витков в катушке будет 80, так как

$$W_{эфф} = W_{пол} - 2W_{биф} = 116 - 2 \cdot 18 = 80,$$

где $W_{биф}$ — число встречных витков, образующих с таким же количеством витков прямой намотки бифилярную катушку.

14. ВИДЫ ОБМОТОК

Обмотки асинхронных однофазных электродвигателей, так же как и трехфазных, могут быть однослойными и двухслойными. Однослойные обмотки чаще всего выполняются катушечными (концентрическими), а двухслойные — петлевыми секционными.

Обмотки конденсаторных электродвигателей выполняются чаще всего двухслойными.

В однофазных электродвигателях применяются также специальные обмотки. К ним относятся, например, «синусные» обмотки, которые по своему исполнению сочетают основные черты однослойных и двухслойных обмоток. По форме катушек «синусные» обмотки подобны однослойным катушечным (концентрическим) обмоткам, но во всех или в большинстве пазов располагаются две секционные стороны, как в двухслойных обмотках (см. рис. 68). Характерным для «синусных» обмоток является то, что их катушки выполняются с разным числом витков, а распределение проводников по пазам подчинено определенному графику, где для каждого паза указаны число проводников рабочей и число проводников вспомогательной (пусковой) обмоток.

Преимуществом «синусной» обмотки является то, что она в связи с определенным распределением проводников по пазам улучшает форму кривой магнитного поля, приближая ее к синусоидальной.

На рис. 58 приведена схема однослойной секционной обмотки «вразвалку» двухполюсного однофазного электродвигателя, подключаемого к однофазной сети через пусковой элемент (активное сопротивление, индуктивное сопротивление, емкость).

Число всех пазов 24, число пазов на полюс, а следовательно, и число катушек в катушечной группе рабочей обмотки $q_A=8$, а пусковой $q_B=4$, так как $z_A=16$, $z_B=8$. Как и во всех обмотках «вразвалку», здесь вместо катушечных групп размещены на статоре катушечные полугруппы с половинным числом катушек, приходящихся на полюс, а соединения катушечных полугрупп

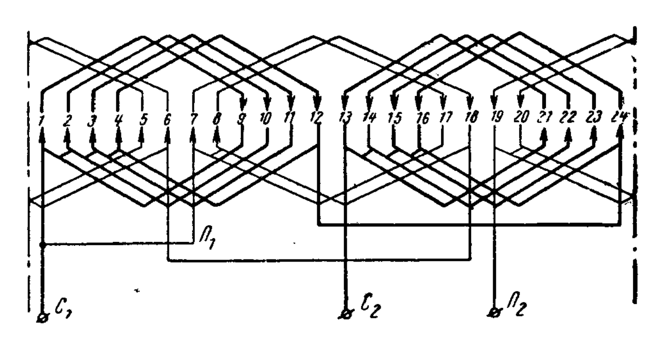


Рис. 58. Схема однослойной секционной обмотки «вразвалку» однофазного электродвигателя с пусковым элементом.

$z=24$; $2p=2$; $q_A=8$; $q_B=4$; $y_A=8$; $y_B=10$.

выполнены так, чтобы фазная зона состояла из q катушечных сторон («конец с концом, начало с началом»). На один паз приходится 15 *эл. град*, фазная зона рабочей обмотки занимает, как и должно, 120 *эл. град*, сдвиг между рабочей и пусковой обмотками составляет 90 *эл. град*. Шаг по пазам рабочей обмотки $y_A=1$—9, пусковой $y_B=1$—11. В обмотках «вразвалку» однофазных электродвигателей шаг выбирается таким, чтобы катушечная полугруппа рабочей обмотки охватывала q_B сторон катушек пусковой обмотки, а катушечная полугруппа пусковой обмотки охватывала q_A сторон рабочей обмотки.

На рис. 59 приведена схема однослойной секционной обмотки «вразвалку» двухполюсного однофазного электродвигателя, подключаемого к сети через пусковой элемент. Число всех пазов 18, число пазов на полюс рабочей обмотки $q_A=6$, пусковой $q_B=3$. Здесь катушечная группа пусковой обмотки имеет нечетное число катушек, поэтому одна катушечная полугруппа состоит

из двух катушек, а другая — из одной катушки. По этой же причине катушечные полугруппы пусковой обмотки имеют разные шаги по пазам ($y_{1B}=7$; $y_{2B}=8$).

Сдвиг по статору между рабочей и пусковой обмотками 100 *эл. град*. В остальном обмотка по рис. 59 подобна обмотке рис. 58.

К числу наиболее распространенных обмоток однофазных электродвигателей относится однослойная кату-

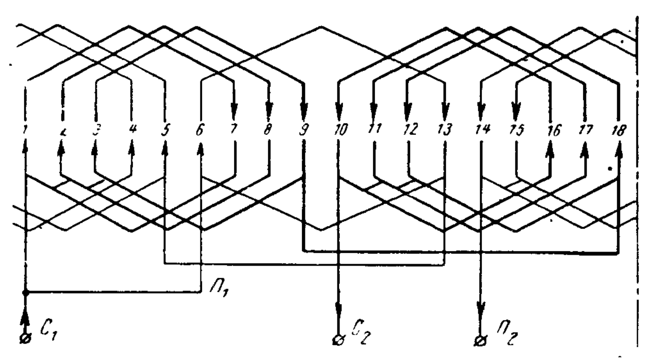


Рис. 59. Схема однослойной секционной обмотки «вразвалку» однофазного электродвигателя с пусковым элементом.

$z=18$; $2p=2$; $q_A=6$; $q_B=3$; $y_A=6$; $y_{1B}=7$; $y_{2B}=8$.

шечная (концентрическая) обмотка «вразвалку» электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением. В качестве примера приведена схема обмотки четырехполюсного электродвигателя АОЛБ 31/4 (рис. 60) мощностью 0,27 *квт*.

Данные обмотки: $z=24$; $2p=4$; $z_A=16$; $z_B=8$; $q_A=4$; $q_B=2$. Ширина фазной зоны 120 *эл. град*, сдвиг между рабочей и пусковой обмотками 90 *эл. град*.

В целях увеличения активного сопротивления пусковая обмотка выполнена с бифилярными катушками. Каждая из четырех катушек пусковой обмотки состоит фактически из двух катушек; одну можно назвать активной в смысле участия ее в создании магнитного потока, другую — бифилярной, так как она выполнена бифилярно; последняя в создании магнитного потока не участвует.

Для получения бифилярной катушки необходимо уложить в одни и те же два паза две катушки (секции), одна из которых должна быть повернута на 180°. При одинаковом числе витков в обеих секциях вся катушка будет бифилярной, при разном числе витков катушка будет состоять как бы из двух катушек — активной и бифилярной. Для того чтобы получить в каждой катушке пусковой обмотки указанного выше электродвига-

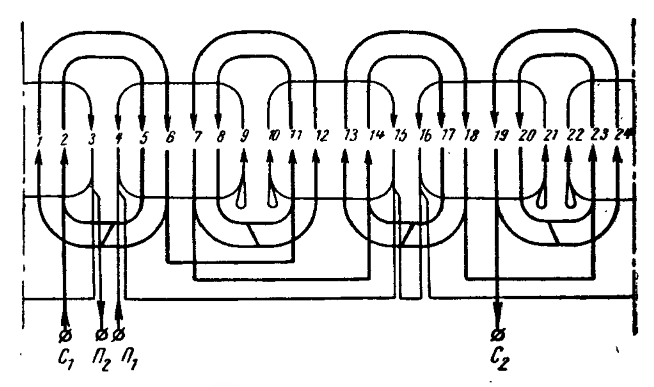


Рис. 60. Схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки «вразвалку» однофазного электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением.
$z=24$; $2p=4$; $q_A=4$; $q_B=2$; $y_{1A}=3$; $y_{2A}=5$; $y_B=5$.

теля 76 заданных эффективных витков при 114 полных витках, следует уложить в соответствующие пазы одну поверх другой две катушки (секции): одну с числом витков (114—76) : 2=38 : 2=19, другую — с числом их 114—19=95, развернув одну из них на 180°. Бифилярная катушка в этом случае будет состоять из 114—76= =38 витков, активная — из 114—38=76 витков. На схеме обмотки (рис. 60) из 9-го, 10-го, 21-го и 22-го пазов выходят петли, получившиеся при разворачивании катушек на 180°. В каждом пазу, где расположена пусковая обмотка, ток проходит по одной части проводов в одном направлении, а по другой — в обратном. Полярность полюсов определяет ток того направления, в котором он проходит по большему числу проводников.

На рис. 61 приведена круговая схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки «вразвалку»

однофазного четырехполюсного электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением. Данные этой обмотки те же, что и обмотки, приведенной на рис. 60. На круговой схеме нагляднее показаны секции, образующие попарно бифилярную и активную катушки.

На рис. 60 и 61 развернутыми на 180° оказались секции с бо́льшим числом витков; они и определили на-

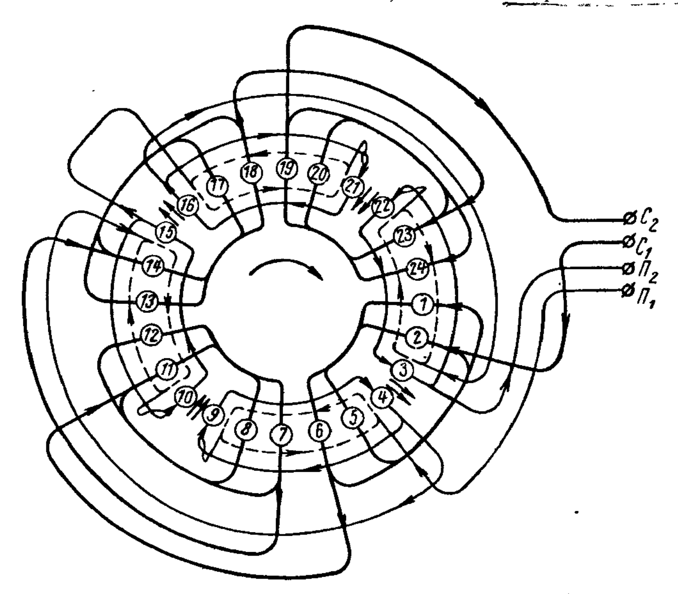


Рис. 61. Круговая схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки «вразвалку» однофазного электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением. $z=24$; $2p=4$; $q_A=4$; $q_B=2$; $y_{1A}=3$; $y_{2A}=5$; $y_B=5$.

правление тока в катушках. Исходя из этого, секции с бо́льшим числом витков часто называют основными, а с меньшим числом витков — бифилярными.

Рассмотрим схему однослойной катушечной (концентрической) обмотки однофазного двухполюсного электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением, например электродвигателя АОЛБ 31/2 мощностью 0,4 *квт* (рис. 62).

Данные обмотки: $z=24$; $2p=2$; $z_A=16$; $z_B=8$; $q_A=8$; $q_B=4$. Сдвиг между рабочей и пусковой обмотками

120 *эл. град*. Здесь за начало рабочей обмотки следует считать 1-й паз, за начало пусковой обмотки — 21-й паз; сдвиг 20 пазов. На один паз приходится $(360\ p):z=$ $=(360\cdot 1):24=15$ *эл. град*. Сдвиг, выраженный в электрических градусах, будет: $20\cdot 15=300$. Вычтя из 300 *эл. град* 2×90, получим 120 *эл. град*. Следовательно, в этой обмотке имеем отклонение от требуемого тео-

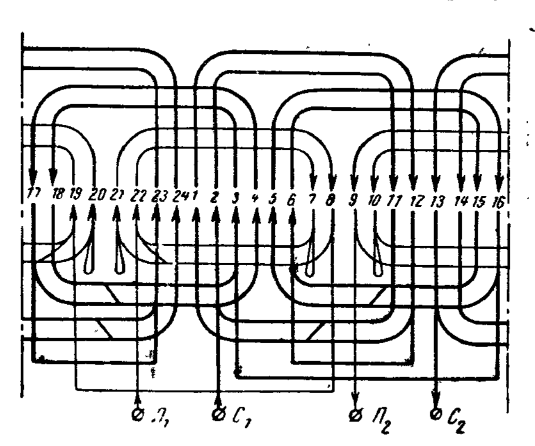


Рис. 62. Схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки однофазного электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением.

$z=24$; $2p=2$; $q_A=8$; $q_B=4$; $y_{1A}=y_{1B}=9$; $y_{2A}=$ $=y_{2B}=11$.

ретически пространственного сдвига между рабочей и пусковой обмотками (90 *эл. град*), вызванное уступкой технологическим требованиям выполнения обмотки. В обмотках «вразвалку» при $q_A=8$ каждая катушечная полугруппа рабочей обмотки должна была состоять из четырех катушек, что вызвало бы при намотке значительное удлинение лобовых частей. Фактически рабочая обмотка выполнена комбинированной: часть двойных катушек соединена по правилу «конец с концом, начало с началом», а часть — «конец с началом». Пусковая обмотка выполнена «вразвалку». Каждая катушечная полугруппа пусковой обмотки состоит из двух катушек, а каждая катушка выполнена из двух секций и включает бифилярную и активную катушки. По на-

правлению тока в катушках пусковой обмотки видно, что развернутыми на 180° оказались секции с меньшим числом витков. Петли бифилярной обмотки выходят с 7-го, 10-го, 20-го и 21-го пазов.

На рис. 63 приведена схема двухслойной обмотки однофазного двухполюсного двигателя с пусковым элементом.

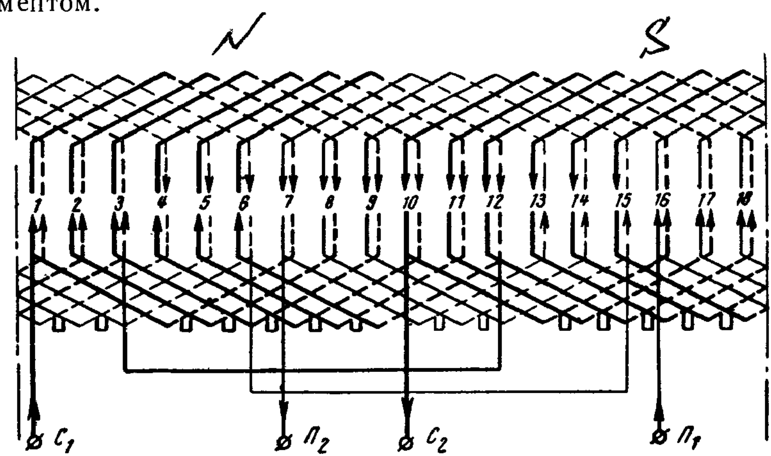


Рис. 63. Схема двухслойной обмотки однофазного электродвигателя с пусковым элементом.

$z=18$; $2p=2$; $q_A=6$; $q_B=3$; $y_A=y_B=6$.

Данные обмотки: $z=18$; $2p=2$; $z_A=12$; $z_B=6$; $q_A=6$; $q_B=3$. Шаг по пазам рабочей и пусковой обмоток $y_A=$ $=y_B=6$ при диаметральном шаге 9. Сдвиг между рабочей и пусковой обмотками 120 *эл. град* ($300-2\cdot 90=$ $=120$). Каждая катушечная группа рабочей обмотки состоит из шести катушек, а пусковая — из трех.

До сих пор мы рассматривали однослойные и двухслойные обмотки асинхронных однофазных электродвигателей с внешним (вынесенным) или встроенным пусковым элементом. Рассмотрим теперь обмотки однофазных конденсаторных электродвигателей.

На рис. 64 приведена схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки «вразвалку» конденсаторного электродвигателя для магнитофонов типа ДВА-У3.

Данные обмотки: $z=24$; $2p=4$; $z_A=z_B=12$; $q_A=$ $=q_B=3$; $y_{1A}=y_{1B}=4$; $y_{2A}=y_{2B}=6$. Ширина фазной зоны

90 *эл. град*; сдвиг между рабочей и конденсаторной обмотками 90 *эл. град*.

Так как обмотка (рис. 64) выполнена «вразвалку» и на катушечную полугруппу приходится $\frac{3}{2}=1\frac{1}{2}$ катушки, то все катушки рабочей и конденсаторной обмотки, имеющие шаг 6, разделены на две части с поло-

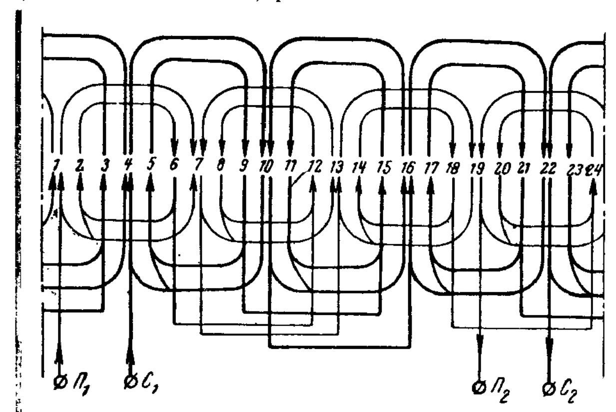


Рис. 64. Схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки «вразвалку» однофазного конденсаторного двигателя.

$z=24$; $2p=4$; $q_A=q_B=3$; $y_{1A}=y_{1B}=4$; $y_{2A}=y_{2B}=6$.

винным числом витков в секции и образуют так называемые «расчесанные» катушки. Соединения между катушечными полугруппами как рабочей, так и конденсаторной обмоток выполнены по правилам построения обмоток «вразвалку».

На рис. 65 приведена схема однослойной секционной комбинированной обмотки однофазного конденсаторного двигателя ДВА-У4.

Данные обмотки: $z=24$; $2p=8$; $z_A=z_B=12$; $q_A=q_B=1\frac{1}{2}$; $y_A=y_B=3$; ширина фазной зоны неодинакова; чередуется ширина — 120 и 60 *эл. град*; в среднем получается 90 *эл. град*. Сдвиг между рабочей и конденсаторной обмотками 120 *эл. град*. Дробное число пазов на полюс явилось причиной того, что обмотка выполнена комбинированной; она имеет признаки обычной секционной обмотки «вразвалку» и двухслойной обмотки.

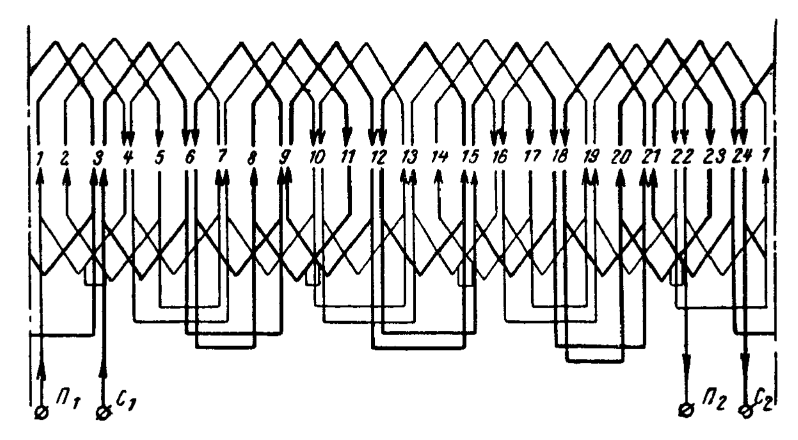


Рис. 65. Схема однослойной секционной обмотки (комбинированной) однофазного конденсаторного двигателя.
$z=24$; $2p=8$; $q_A=q_B=1^1/_2$; $y_A=y_B=3$.

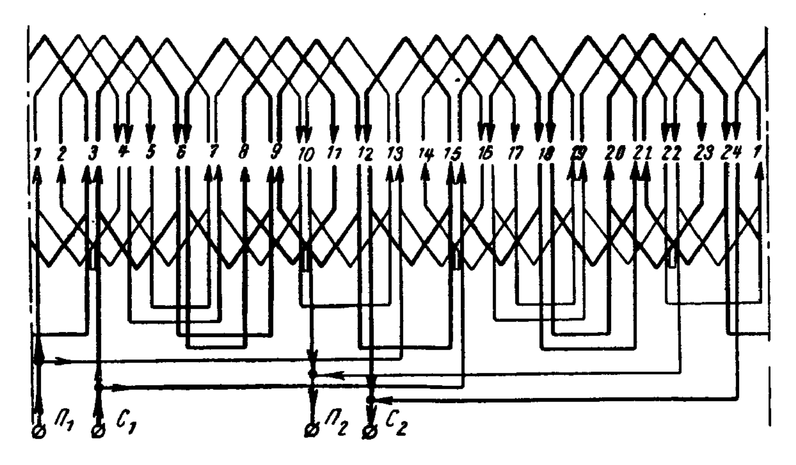


Рис. 66. Схема однослойной секционной обмотки (комбинированной) однофазного конденсаторного двигателя.
$z=24$; $2p=8$; $q_A=q_B=1^1/_2$; $y_A=y_B=3$; $a=2$.

В рабочей и конденсаторной обмотках имеется по две целых и восемь половинных катушек. Соединение катушек выполнено по правилу «конец с концом, начало с началом».

Рассмотренная выше обмотка (рис. 65) предусмотрена для электродвигателя напряжением 220 *в*. На

рис. 66 приведена подобная обмотка, но с двумя параллельными ветвями, применяемая в конденсаторном двигателе ДВА-У4 напряжением 110 *в*.

В разработанной и внедряемой в настоящее время в производство единой серии однофазных электродвигателей типа АВЕ широкое применение получила двухслойная обмотка. На рис. 67 приведена схема двухслой-

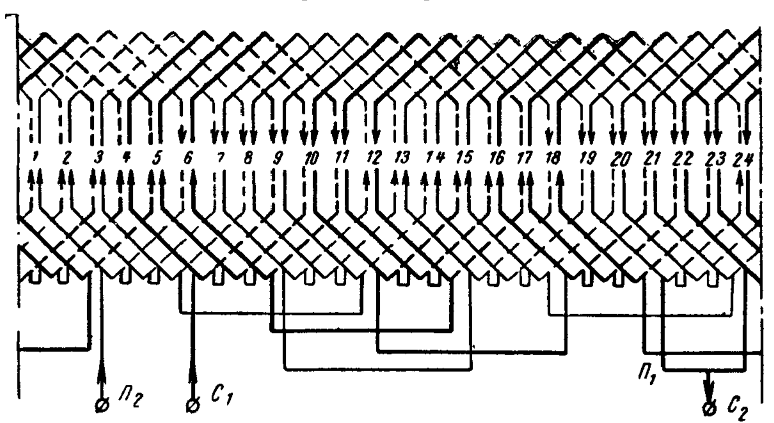


Рис. 67. Схема двухслойной обмотки однофазного конденсаторного двигателя.
$z=24$; $2p=4$; $q_A=q_B=3$; $y_A=y_B=5$.

ной обмотки однофазного конденсаторного электродвигателя типа АВЕ-071, предназначенного в основном для привода стиральных машин и призванного заменить однофазные двигатели типа АОЛБ второго габарита.

Данные обмотки: $z=24$; $2p=4$; $z_A=z_B=12$; $q_A=$ $=q_B=3$; $y_A=y_B=5$. Ширина фазной зоны 90 *эл. град*; сдвиг между рабочей и конденсаторной обмотками 90 *эл. град*, так как на один паз приходится $(360\ p) : z=(360 \cdot 2) : 24=30$ *эл. град*, а начало рабочей и конденсаторной обмоток расположены на расстоянии 15 пазов ($15 \cdot 30-4 \cdot 90=90$ *эл. град*).

В рабочей и конденсаторной обмотках по четыре катушечные группы; каждая катушечная группа состоит из трех катушек. Соединение катушечных групп выполнено по известному правилу для двухслойных обмоток. Для получения заданного направления вращения электродвигателя (по часовой стрелке) при принятом на за-

воде-изготовителе порядке намотки статора выводы C_2 и $П_1$ показаны соединенными в лобовой части обмотки.

Выше говорилось о преимуществах специальных «синусных» обмоток по сравнению с обычными. На рис. 68 представлена схема «синусной» обмотки однофазных электродвигателей типов ДХМ-3 и ДХМ-5, применяемых в домашних холодильниках.

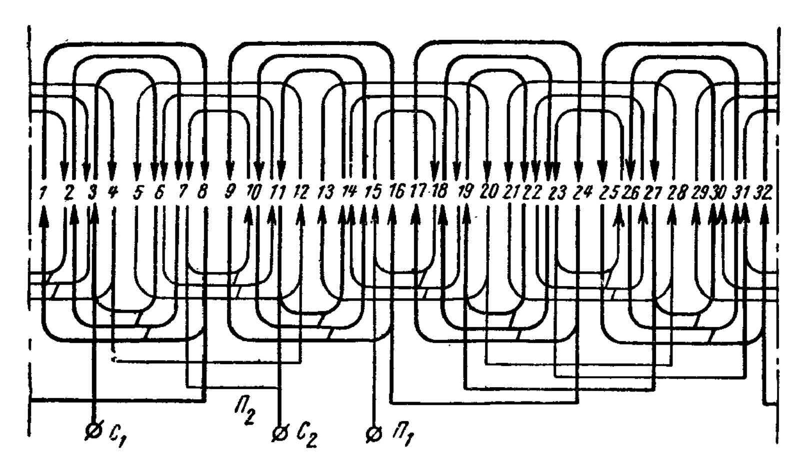


Рис. 68. Схема «синусной» обмотки однофазного электродвигателя с пусковой обмоткой.

$z=32$; $2p=4$; $y_{1A}=y_{1B}=3$; $y_{2A}=y_{2B}=5$; $y_{3A}=y_{3B}=7$.

Данные обмотки: $z=32$, $2p=4$; $y_{1A}=y_{1B}=3$; $y_{2A}=y_{2B}=5$; $y_{3A}=y_{3B}=7$. Сдвиг между рабочей и пусковой обмотками 90 *эл. град* ($22{,}5\cdot 12-2\cdot 90=90$). Рабочая и пусковая обмотки выполнены катушечными (концентрическими); катушечные группы состоят из трех катушек каждая. По технологии сначала укладывают рабочую обмотку в нижнюю часть пазов статора, а потом пусковую — в верхнюю часть пазов, что облегчает ремонт пусковой обмотки, которая чаще оказывается поврежденной. Четыре катушки с шагом $y=7$ рабочей и четыре катушки пусковой обмотки занимают своими сторонами по целому пазу. В остальных пазах расположено по две стороны катушек.

Рабочая обмотка двигателя ДХМ-5 (на 220 *в*) выполнена из провода диаметром 0,67 *мм*, имеет 1 240 витков и омическое сопротивление 13,7 *ом*, а пусковая об-

мотка выполнена из провода диаметром 0,29 *мм*, имеет 692 витка и омическое сопротивление 36,5 *ом*. Значительная разница в активных сопротивлениях рабочей и пусковой обмоток наряду с некоторой разницей в индуктивных сопротивлениях обусловливает необходимый сдвиг токов во времени для получения вращающегося магнитного поля в данном электродвигателе.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ОПИСАНИЕ ОБМОТОК МНОГОСКОРОСТНЫХ АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

15. СХЕМЫ ОБМОТОК МНОГОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЕДИНОЙ СЕРИИ А, АО И НОВОЙ ЕДИНОЙ СЕРИИ А2, АО2 *

Асинхронные электродвигатели, у которых скорость вращения регулируется посредством изменения числа полюсов обмотки статора, носят название многоскоростных.

Многоскоростные электродвигатели серий А, АО и А2, АО2 выполняются с двумя, тремя и четырьмя скоростями при 4/2, 6/4, 8/4, 12/6, 6/4/2, 8/6/4 и 12/8/6/4 полюсах.

Двухскоростные электродвигатели с отношением чисел полюсов (меньшего к большему) 1 : 2, например при скоростях вращения 3 000/1 500, 1 500/750, 1 000/500 *об/мин*, выполняются с одной обмоткой статора, которую с помощью специального переключателя

---

* Новая единая серия электродвигателей А2 и АО2 имеет шкалу мощностей: 0,6; 0,8; 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 5,5; 7,5; 10; 13; 17; 22; 30; 40; 55; 75; 100 *квт*.

Применение обмоточных эмалированных проводов повышенной нагревостойкости, а также пазовой и междуфазной изоляции высокого качества позволило повысить к. п. д. на 1,7% и снизить вес электродвигателей примерно на 15% по сравнению с равноценными по мощности электродвигателями серии А и АО.

Наряду с электродвигателями основного исполнения в классификацию асинхронных трехфазных электродвигателей серии А2 и АО2 включены: электродвигатели с алюминиевой оболочкой; электродвигатели с алюминиевой обмоткой; многоскоростные; электродвигатели различных модификаций и специализированных исполнений.

переключают на два различных числа полюсов. Обмотки, позволяющие производить переключение одного числа полюсов на другое, носят название полюсно-переключаемых или двухскоростных.

Двухскоростные электродвигатели с отношением чисел полюсов, не равным 1 : 2, например при скоростях вращения 1 500/1 000 *об/мин* и числе полюсов 4/6, выполняются с двумя обычными, электрически не связанными обмотками, где каждая рассчитана на одно число полюсов.

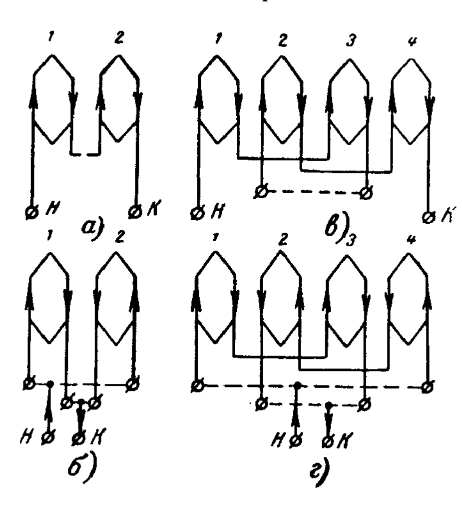


Рис. 69. Схема одной фазы двухскоростной обмотки.

а — на 4 полюса; *б* — на 2 полюса; *в* — на 8 полюсов; *г* — на 4 полюса.

Трехскоростные двигатели с числом полюсов 6/4/2 и 8/6/4 выполняются с двумя обмотками: одна — двухскоростная для переключения чисел полюсов в отношении 1 : 2 (4/2 и 8/4 соответственно) и другая — обычная обмотка на 6 полюсов.

Четырехскоростные электродвигатели с числом полюсов 12/8/6/4 выполняются с двумя независимыми двухскоростными обмотками, каждая с переключением полюсов в отношении 1 : 2 (12/6 и 8/4).

В многоскоростных электродвигателях ротор выполняется обычно короткозамкнутым. Применение ротора с фазной обмоткой и контактными кольцами значительно усложнило бы конструкцию электродвигателя и потребовало бы дополнительного переключателя для изменения числа полюсов обмотки ротора соответственно изменению числа полюсов обмотки статора.

Многоскоростные электродвигатели изготовляются для работы от сети напряжением 220, 380 и 500 *в*.

Переключение чисел полюсов в отношении 1 : 2 в двухскоростной обмотке осуществляется путем изменения направления тока в половине катушечных групп

обмотки. Для этой цели каждую фазу обмотки разбивают на две части, в одну из которых входят все четные катушечные группы, а в другую — все нечетные.

Изменяя направление тока в половине катушечных групп каждой фазы, получают вдвое меньшее число полюсов обмотки.

На рис. 69,*а* приведена схема одной фазы двухскоростной обмотки при включении ее на 4 полюса, а на рис. 69,*б* — на 2 полюса. На рис. 69,*в* и *г* показана также одна фаза обмотки при включении ее на 8 полюсов и на 4 полюса. В каждой фазе (рис. 69) ток меняет свое направление столько раз, сколько получается полюсов в двухскоростной обмотке. Нетрудно также заметить, что число катушечных групп для получения двухскоростной обмотки должно быть равно меньшему числу полюсов. При другом числе катушечных групп в фазе двухскоростная обмотка с отношением чисел полюсов 1 : 2 не получится.

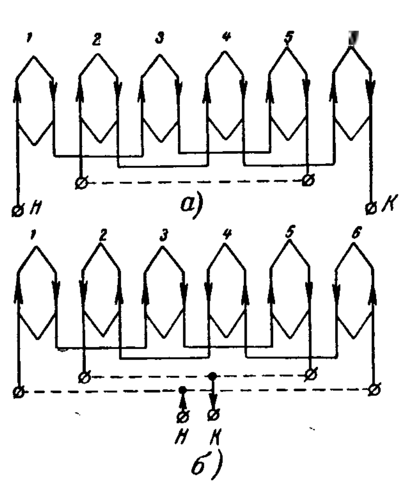


Рис. 70. Схема одной фазы двухскоростной обмотки.
а — на 12 полюсов; *б* — на 6 полюсов.

На рис. 70 приведена схема одной фазы двухскоростной обмотки с шестью катушечными группами. Меньшее число полюсов такой обмотки будет 6, большее—12, а скорости вращения 1 000 и 500 *об/мин* соответственно.

Для получения в каждой фазе обмотки числа катушечных групп, равного меньшему числу полюсов, следует число пазов на полюс и фазу, а значит, и число катушек в катушечной группе q вычислять тоже по меньшему числу полюсов. Например, для многоскоростного электродвигателя с отношением скоростей вращения 1 500/750 и полюсов 4/8 при $z=36$ число пазов на полюс и фазу q будет:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{36}{4\cdot 3}=3.$$

Поскольку многоскоростные электродвигатели обычно имеют двухслойную обмотку, то применительно к данному выше примеру число катушек будет равно в обмотке 36, а в фазе 12. Следовательно, фаза будет иметь 12 : 3=4 катушечные группы, что соответствует меньшему числу полюсов. В общем случае обмотка будет иметь $3p$ катушечные группы, где p — большее число пар полюсов.

Шаг по пазам в двухскоростной обмотке принимается по большему числу полюсов, а для обмотки с меньшим числом полюсов шаг будет укороченным наполовину.

Расстояние между началом фаз двухскоростной обмотки определяют по меньшему числу полюсов, т. е. при вычислении $^2/_3\tau$ полюсное деление τ определяют для меньшего числа полюсов. Можно не вычислять $^2/_3\tau$, а принимать расстояние между началами фаз в схеме обмотки равным $2q$.

В двухскоростных обмотках при отношении полюсов 8/4 и 12/6 расстояние между началами фаз принимают равным $4q$, что не нарушает электрической симметрии обмотки.

Таким образом, при конструировании двухскоростной обмотки с отношением чисел полюсов 1 : 2 число катушек в катушечной группе и полюсное деление τ для определения начала фаз вычисляют по меньшему числу полюсов, а шаг обмотки — по большему числу полюсов.

Каждая фаза двухскоростной обмотки должна иметь три вывода: начало, середину и конец. Изменение направления тока в одной половине каждой фазы достигается переносом питания из начала в середину фазы с помощью переключателя, который в первом случае соединяет фазы по схеме треугольник (△), а во втором случае — по схеме две звезды (⅄⅄).

Каждая двухскоростная обмотка с отношением чисел полюсов 1 : 2 имеет всего шесть идущих к переключателю выводов, так как три вывода (по одному от каждой фазы) соединяются с тремя другими выводами внутри схемы обмотки, образуя соединение треугольник.

Многоскоростной электродвигатель с отношением чисел полюсов 4 : 6 имеет также шесть идущих к переключателю выводов, по три от каждой обмотки,

а остальные три вывода каждой обмотки соединены внутри схемы в звезду (⅄).

На рис. 71 приведена схема двухслойной двухскоростной секционной обмотки многоскоростного электродвигателя на 1 500 и 3 000 *об/мин.*

Данные обмотки: $z=36$; $2p=4/2$; $q=6$; $y=1-10$; соединение $\triangle$/⅄⅄.

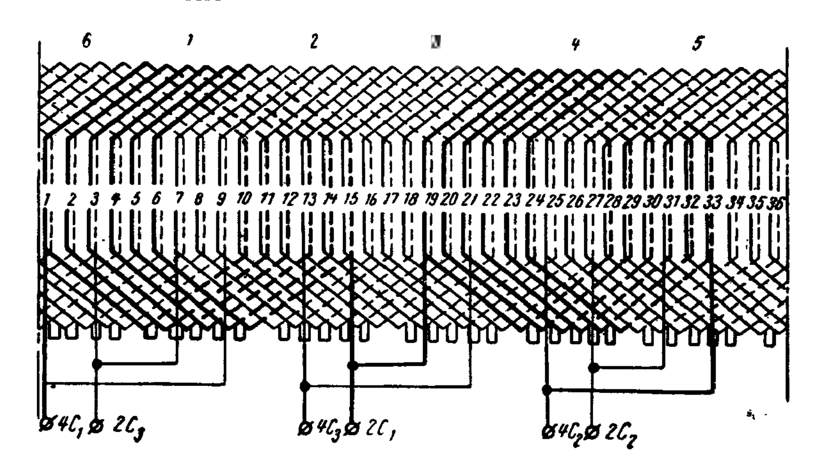


Рис. 71. Схема двухслойной двухскоростной секционной обмотки многоскоростного электродвигателя.
$z=36$; $2p=4/2$; $y=1-10$; соединение $\triangle$/⅄⅄.

Как и для всякой двухскоростной обмотки с отношением чисел полюсов 1 : 2, здесь число катушек в катушечной группе вычислено по меньшему числу полюсов:

$$q=z:2pm=36:2\cdot 3=6,$$

а шаг вычислен по большему числу полюсов: $y=z:2p=36:4=9$. Катушечных групп в обмотке шесть, а в фазе две. Обмотка соединена внутри схемы в треугольник. Выводами из вершин треугольника являются концы с обозначениями: $4C_1$, $4C_2$, $4C_3$, где буквами с цифровыми индексами C_1, C_2, C_3 обозначены начала фаз обмотки, а цифра 4 показывает то число полюсов, которое получится при подключении этих выводов обмотки к сети трехфазного переменного тока.

От середины каждой фазы обмотки отходит по выводу для получения высшей скорости. Выводы для по-

лучения меньшего числа полюсов и соответственно высшей скорости на схеме обозначены: $2C_1$, $2C_2$, $2C_3$, где цифра 2 — число полюсов, а обозначения C_1, C_2, C_3 — начала фаз двойной звезды, при подключении которых к сети получится указанное на выводах число полюсов.

Начало 2-й фазы на схеме обмотки должно размещаться через $2q=2\cdot6=12$ пазов от начала 1-й фазы;

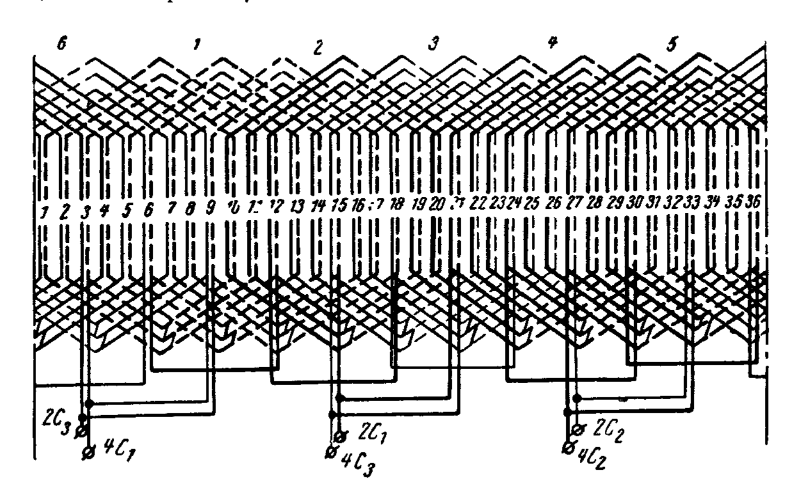


Рис. 72. Схема двухслойной двухскоростной катушечной (концентрической) обмотки многоскоростного электродвигателя. $z=36$; $2p=4/2$; $y=1-10$; соединение Δ/ҮҮ.

на самом деле вывод, отходящий от 13-го паза, имеет обозначение $4C_3$, а отходящий от 25-го паза — $4C_2$. Здесь как бы нарушено правило построения схем обмоток. Однако перемена индексов начал двух фаз низшей или высшей скорости очень часто выполняется на схемах двухскоростных обмоток, чтобы обеспечить одинаковое направление вращения электродвигателя при последовательной нумерации зажимов на щитке или переключателе полюсов и согласованном подключении выводов к зажимам.

В тех случаях, когда не изменено чередование фаз для одной из скоростей в самой обмотке, следует обеспечить переключение любых двух фаз питающей сети, т. е. поменять их местами, при переходе с одного числа полюсов на другое.

На рис. 72 приведена схема двухслойной двухскоростной катушечной (концентрической) обмотки многоскоростного электродвигателя на 1 500 и 3 000 *об/мин*.

Данные обмотки: $z=36$; $2p=4/2$; $q=6$; $y=1-10$; соединение $\triangle/\curlywedge\curlywedge$.

Схема обмотки рис. 72 отличается от схемы обмотки рис. 71 только тем, что первая выполнена катушечной (концентрической) и, кроме того, каждая катушечная группа, состоящая из шести катушек, искусственно разбита на две катушечные полугруппы, которые укладываются в статоре рядом и соединяются последовательно (конец с началом). Катушечных групп в обмотке 6, в фазе — 2. Раздвоение катушечных групп в данной обмотке произведено в целях уменьшения длины лобовых частей.

Схема двухслойной двухскоростной обмотки многоскоростного электродвигателя на 750 и 1 500 *об/мин* приведена на рис. 73.

Данные обмотки: $z=54$; $2p=8/4$; $q=4^1/_2$; $y=1-8$, соединение $\triangle/\curlywedge\curlywedge$.

Число пазов на полюс и фазу для данной обмотки получилось дробным:

$$z:2pm=54:4\cdot 3=54:12=4^1/_2.$$

Следовательно, катушечные группы с числом катушек 4 и 5 будут в каждой фазе чередоваться. На схеме обмотки (рис. 73) 1-я и 10-я катушечные группы 1-й фазы состоят из пяти катушек, а 4-я и 7-я — из четырех катушек.

Шаг обмотки взят по большому числу полюсов:

$$y=\frac{z}{2p}=\frac{54}{8}=6^3/_4\approx 7.$$

Для получения низшей скорости (соединение $\triangle$) от обмотки отходят выводы с обозначениями $8C_1$, $8C_2$, $8C_3$, а для высшей скорости (соединение $\curlywedge\curlywedge$) — выводы с обозначениями $4C_1$, $4C_2$, $4C_3$. На схеме обмотки индексы на выводах, обозначающие 2-ю и 3-ю фазу при четырех полюсах взаимно заменены для изменения чередования фаз и получения в связи с этим одинакового направления вращения ротора двигателя при обеих скоростях. Расстояния между началами фаз взято $4q=$

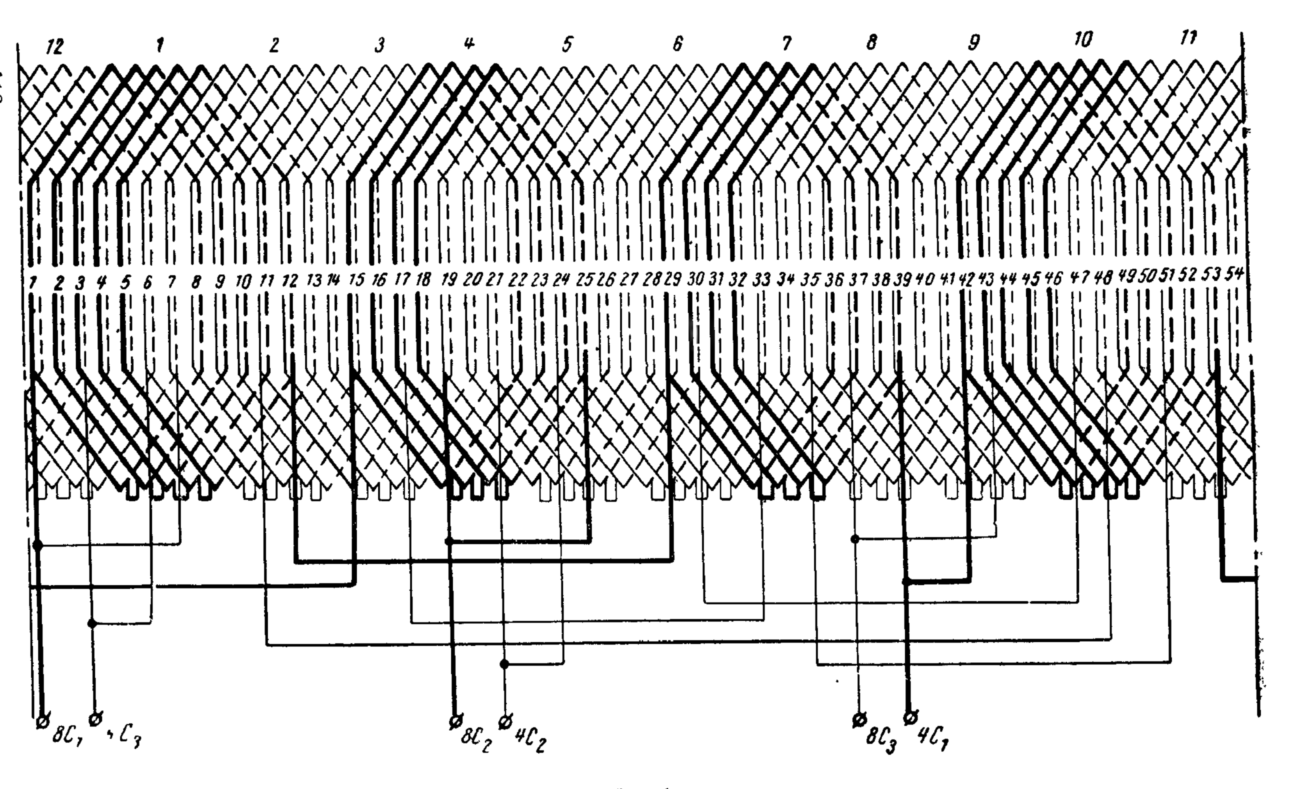


Рис. 73. Схема двухслойной двухскоростной обмотки многоскоростного электродвигателя.
$z=54$; $2p=8/4$; $y=1-8$; соединение $\Delta/\lambda\lambda$.

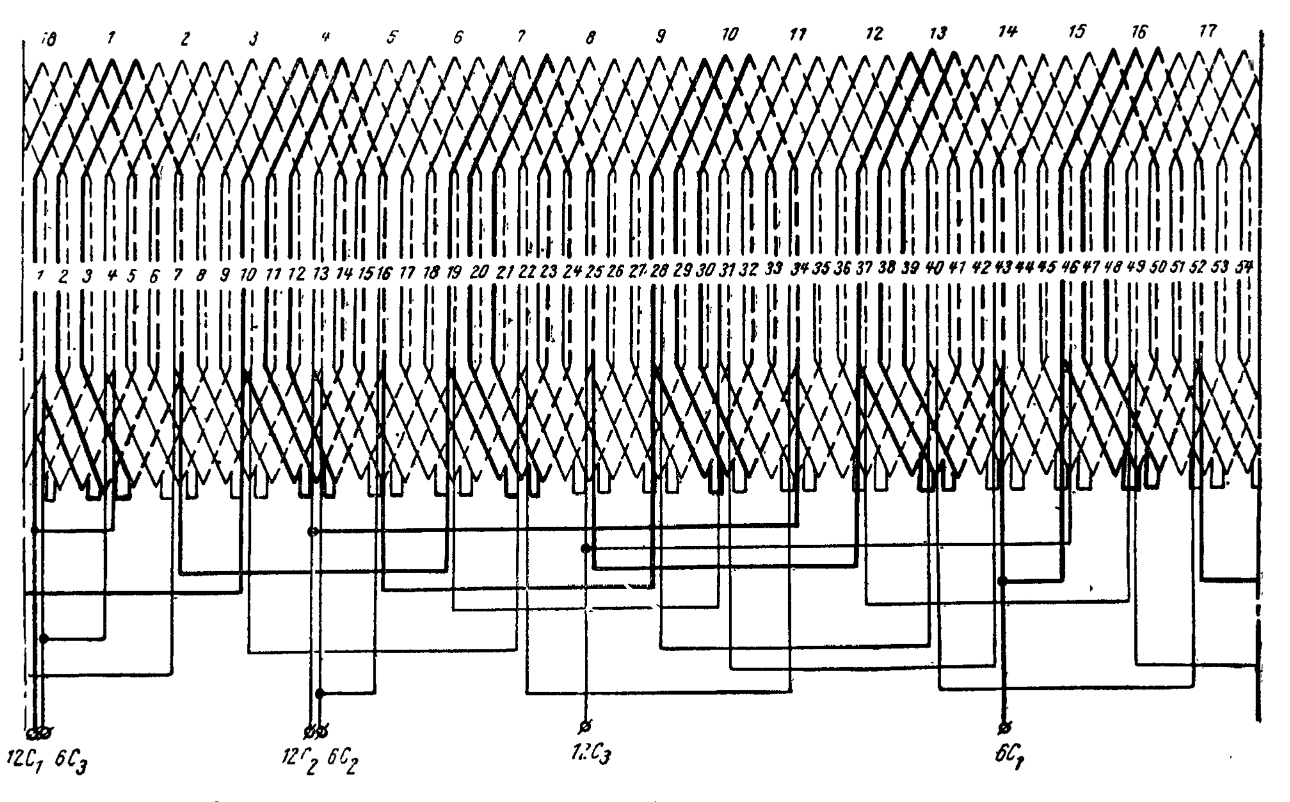


Рис. 74. Схема двухслойной двухскоростной обмотки многоскоростного электродвигателя. $z=54$; $2p=12/6$; $y=1-5$; соединение $\Delta/\lambda\lambda$.

$=4\cdot 4^{1}/_{2}=18$. Поэтому выводы $8C_1$, $8C_2$ и $8C_3$ выходят из 1-го, 19-го и 37-го пазов.

Схема двухслойной двухскоростной обмотки многоскоростного электродвигателя на 500 и 1 000 *об/мин* приведена на рис. 74.

Данные обмотки: $z=54$; $2p=12/6$; $q=3$; $y=1-5$; соединение $\triangle/\curlywedge\curlywedge$.

Проверим правильность выбора основных данных этой обмотки.

а) Число катушек в катушечной группе

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{54}{6\cdot 3}=3.$$

б) Шаг по пазам

$$y=\frac{z}{2p}=\frac{54}{12}=4\frac{1}{2};$$

на схеме обмотки шаг взят 4, т. е. с укорочением на $^{1}/_{2}$ паза.

в) Полюсное деление

$$\tau=\frac{z}{2p}=\frac{54}{6}=9;$$

$$2/3\tau=\frac{2}{3}\cdot 9=6.$$

На схеме обмотки расстояние между началами фаз взято 12 пазов, т. е. удвоенное $(4q)$. В соответствии с этим выводы для включения на 12 полюсов выходят из 1-го, 13-го и 25-го пазов, а для включения на шесть полюсов выводы выходят из 46-го, 4-го и 16-го пазов и обозначены $6C_1$, $6C_3$ и $6C_2$; здесь произведена взаимная замена индексов в обозначениях 2-й и 3-й фаз.

г) Вся обмотка состоит из 18 катушечных групп; на каждую фазу приходится шесть катушечных групп; число катушечных групп в фазе, равно меньшему числу полюсов.

Следовательно, обмотка (рис. 74) составлена правильно.

16. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ МНОГОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЕДИНЫХ СЕРИЙ А, АО И А2, АО2

В § 15 указаны все варианты исполнения по числу полюсов многоскоростных электродвигателей единых серий.

Наиболее простая схема включения требуется для электродвигателя с двумя скоростями вращения при $2p=6/4$. Обе обмотки такого электродвигателя являются независимыми и имеют по три вывода, так как

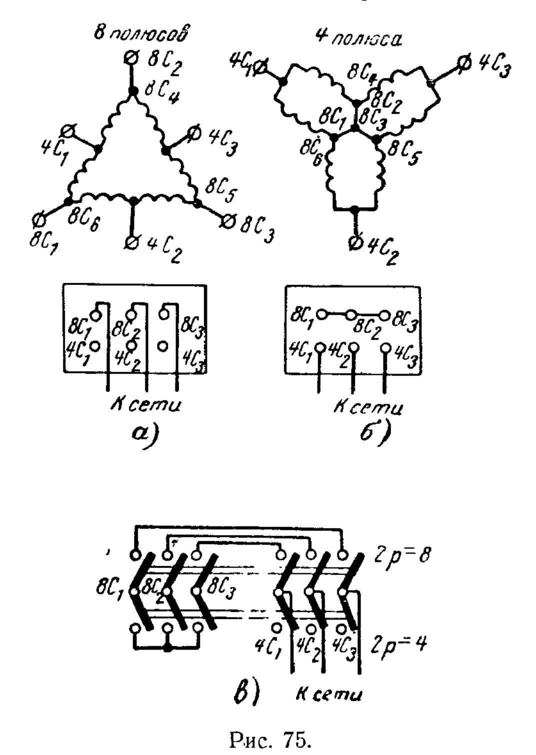


Рис. 75.

а — схема соединения фаз и включения их на щитке в треугольник при 8 полюсах; *б* — схема соединения фаз и включения их на щитке двойной звездой при 4 полюсах; *в* — схема переключения двухскоростной обмотки (с 8 полюсов на 4 полюса) с помощью переключателя.

остальные три вывода каждой обмотки соединены внутри схемы в звезду. Для переключения числа полюсов многоскоростного электродвигателя при $2p=6/4$ можно воспользоваться простым переключателем или даже перекидным рубильником.

Электродвигатели с двумя скоростями и отношением чисел полюсов 1 : 2 также имеют шесть выводов, однако схема включения таких электродвигателей усложняется

тем, что при переключении на меньшее число полюсов требуется не только перенести питание на другие три вывода, но и соединить вместе в общую нулевую точку три вершины треугольника для получения двойной звезды, т. е. звезды с двумя параллельными ветвями.

На рис. 75,*а* сверху приведена схема соединения фаз обмотки в треугольник при восьми полюсах, а ниже показаны расположение зажимов на щитке и подвод питания от сети. Выводы, идущие от середин фаз (для получения меньшего числа полюсов) с обозначениями $4C_3$ и $4C_2$, имеют переставленные взаимно индексы для осуществления одинакового направления вращения при разных скоростях и числах полюсов.

На рис. 75,*б* сверху приведена схема соединения фаз обмотки в двойную звезду при четырех полюсах, а ниже показаны расположение зажимов на щитке, подвод питания от сети и соединение в нулевую точку вершин треугольника для получения двойной звезды.

Для переключения чисел полюсов двухскоростной обмотки в отношении 1 : 2 в двухскоростных электродвигателях может быть применен переключатель, схема которого показана на рис. 75,*в*.

Трехскоростные электродвигатели имеют 9 выводов: 6 — от двухскоростной и 3 — от обычной обмотки, соединенной в звезду, а четырехскоростные электродвигатели имеют по 12 выводов (по 6 от двух двухскоростных обмоток). Поэтому переключение числа полюсов в трех- и четырехскоростных электродвигателях должно выполняться с помощью более сложных переключателей или аппаратов контакторного управления[1].

В многоскоростных электродвигателях с двумя обмотками в статоре при работе включается только одна обмотка. Если невключенная обмотка соединена в треугольник (например в трехскоростном двигателе при работе со скоростью вращения 1 000 *об/мин* и четырехскоростном при работе с любой скоростью вращения), то в цепи неработающей обмотки будет наводиться

[1] Обмотки многоскоростных электродвигателей, позволяющие получать более двух скоростей при одной обмотке (например, у электродвигателей типа Т), или две скорости с отношением чисел полюсов, не равным 1 : 2 (тоже при одной обмотке), подробно описаны в книге А. М. Харитонова «Многоскоростные электродвигатели» (Госэнергоиздат, 1954).

э. д. с. от вращающегося магнитного поля работающей обмотки и будет проходить ток, создавая дополнительные потери и нагрев двигателя.

Чтобы устранить это явление, в некоторых схемах предусматривается размыкание цепи треугольника неработающей обмотки при работе многоскоростного электродвигателя.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

17. ВИДЫ ОБМОТОК РОТОРА

В зависимости от конструкции обмотки ротора делятся на короткозамкнутые и фазные.

Короткозамкнутые обмотки выполняются путем заливки пазов сердечника ротора алюминием с образованием короткозамкнутых колец и вентиляционных крыльев или укладкой в пазы медных, иногда латунных, стержней, которые затем свариваются с медными короткозамыкающими кольцами.

Фазные обмотки ротора бывают двух видов: однослойные катушечные (концентрические) и двухслойные стержневые (волновые).

Катушечные (концентрические) обмотки ротора ничем не отличаются от катушечных (концентрических) обмоток статора, приведенных на рис. 37 и 45. Как правило, три выводных конца обмотки соединяют в звезду внутри схемы (начала или концы фаз), а другие три вывода выводят к контактным кольцам. В зависимости от величины шлица паза катушечные (концентрические) обмотки выполняют всыпными или впротяжку.

Обычно стержневые волновые обмотки применяются в более мощных электродвигателях.

Элементом стержневой обмотки является стержень, который занимает половину паза. Общее количество эффективных стержней в обмотке равно $2z$; эффективный стержень может состоять из двух или нескольких элементарных стержней, которые соединяются с другим эффективным стержнем в лобовой части обмотки.

Стержневые обмотки встречаются с четырьмя, шестью или восемью стержнями (эффективными) в пазу и тоже считаются двухстержневыми обмотками. При составлении таких схем считается, что роторы имеют удвоенное, утроенное или учетверенное число пазов; вычертив такое количество пазов, обмотку размещают так же, как обычную двухстержневую.

18. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ ОБМОТОК РОТОРА

Исходными данными для составления схемы стержневых волновых обмоток являются: число пазов ротора z_2, число полюсов $2p$ и число параллельных ветвей в обмотке ротора a. Шаг волновой обмотки определяется так же, как и в петлевых, и равен числу пазов, разделенному на число полюсов. В противоположность петлевым обмоткам, где укорочение шага обмотки дает экономию меди, в волновых обмотках укорочение шага на расход меди не влияет, так как укорочение с одной стороны ротора влечет за собой удлинение шага обмотки с противоположной стороны. Поэтому волновые обмотки ротора выполняются с диаметральным шагом, за исключением переходов при каждом обходе обмотки, выполняемых с укороченным или удлиненным шагом.

На рис. 76 приведена схема стержневой волновой обмотки с укороченными переходами. Так как диаметральный шаг этой обмотки $y=\frac{z}{2p}=\frac{36}{4}=9$, то с задней стороны ротора и передней стороны его при обычном ходе волны шаг диаметральный, а на переходах укороченный.

Расположение стержней в пазах и соединение их в лобовой части по ходу волны следующие: начало 1-й фазы занимает верхнюю часть 1-го паза, вторая сторона катушки (секции) — нижнюю часть 10-го паза. Стержень, являющийся полукатушкой, расположенной в 1-м пазу, с задней стороны ротора соединен со стержнем, расположенным в нижней части 10-го паза, который в свою очередь с передней стороны ротора соединен со стержнем верхней части 19-го паза. Из 19-го паза, двигаясь по ходу волны, стержень попадает в нижнюю часть 28-го паза, а из 28-го паза, следуя по диаметраль-

ному шагу, он должен войти в верхнюю часть 1-го паза, так как 28+9=37, а $z=36$. Но 1-й паз уже занят началом 1-й фазы, поэтому делается переход ко второй волне, для чего применяется укороченный шаг с передней стороны ротора $y_{п.ук}=8$ (9—1), и следующий по ходу стержень будет уже расположен на один паз ближе и займет верхнюю часть 36-го паза. Соединив этот стержень со стержнем, расположенным в 28-м пазу, и дви-

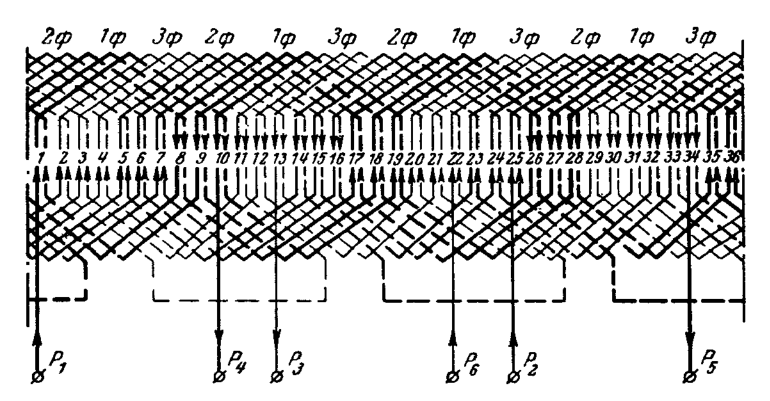


Рис. 76. Схема стержневой волновой обмотки ротора с укороченными переходами.

$z=36$; $2p=4$; $q=3$; $y_п=9$; $y_{п.ук}=8$; $y_з=9$.

гаясь дальше по ходу волны, попадают в 9-й, 18-й и 27-й пазы, откуда должны попасть в 36-й паз, но он уже занят, поэтому снова применяют укороченный шаг на один паз, расположив стержень в 35-м пазу, и начинают 3-й обход обмотки, перемещаясь из 35-го паза в 8-й, из 8-го — в 17-й, а из 17-го — в 26-й паз.

Если далее продолжать движение в принятом направлении, то при укороченном шаге попали бы в 34-й паз, а при следующем обходе — в 33-й и т. д. Таким образом, после трех обходов обмотки получены только две катушечные группы, где каждая состоит из трех катушек, т. е. получены один слой обмотки и две катушечные группы вместо четырех.

Для получения двухслойной обмотки и недостающих двух катушечных групп изменяют направление обходов на обратное. Если обход обмотки был начат против

часовой стрелки, то теперь его продолжают по часовой стрелке. В местах изменения направления обхода ставят перемычки, так как стержень, с которым он должен быть соединен, расположен на некотором расстоянии от него. Таким образом, продолжают движение по волне из нижней части 35-го паза в верхнюю часть 26-го, из 26-го — в нижнюю часть 17-го, из 17-го — в верхнюю часть 8-го паза, откуда должны были попасть в нижнюю часть 35-го паза, который занят, поэтому здесь опять шаг укорачивается на один паз и новый обход начинают из нижней части 36-го паза в верхнюю часть 27-го паза, из 27-го — в нижнюю часть 18-го, из 18-го — в верхнюю часть 9-го, а из 9-го должны были попасть в 36-й паз, но он тоже занят, поэтому снова применяют укорочение шага, расположив стержень в 1-м пазу, и дальше продолжают движение в верхнюю часть 28-го, из 28-го — в нижнюю часть 19-го паза, из 19-го — в верхнюю часть 10-го паза, где и заканчивается третий и последний обход; этот стержень будет служить концом 1-й фазы. Аналогично укладываются остальные фазы после предварительного определения пазов, в которых разместятся начала фаз и перемычки; концы фаз определяются после размещения их обмоток.

Очень важно начала и концы фаз обмоток ротора и перемычки разместить симметрично по окружности во избежание небаланса, который приводит к вибрации ротора. Поэтому начала фаз лучше расположить на расстоянии 120 *геометр. град* друг от друга при сохранении электрической симметрии. Это условие может быть выполнено при расположении начал фаз друг относительно друга на 120 или 240 *эл. град* плюс любое целое число, помноженное на 360 *эл. град*. При симметричном расположении по окружности ротора начал фаз концы фаз и перемычки также симметрично разместятся.

В обмотке рис. 76 начала фаз расположены в 1-м, 25-м и 13-м пазах, что соответствует 480 *эл. град* между фазами. Вычтя из 480 *эл. град* 360, получим 120 *эл. град*, следовательно, кроме геометрической, здесь выдержана и электрическая симметрия. Однако не все обмотки ротора можно выполнить с симметричным расположением начал, концов фаз и перемычек. При числе пар полюсов, кратном 3, выводы фаз и перемычки несимметрично рас-

положатся по окружности и в этих случаях потребуется балансировка ротора.

Составляя схему обмотки ротора, целесообразно обозначить цифрами номера фаз, а стрелками — направление токов и проверить правильность чередования полярности полюсов.

Выводные концы обмотки должны обозначаться согласно ГОСТ: начало 1-й фазы — P_1, начало 2-й фа-

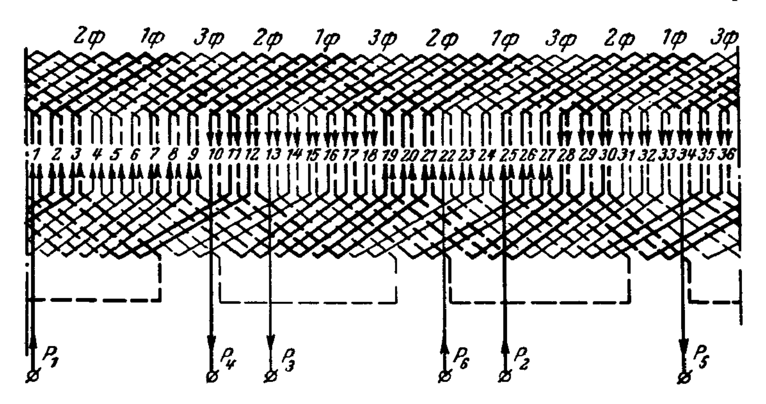


Рис. 77. Схема стержневой волновой обмотки ротора с удлиенными переходами.

$z=36$; $2p=4$; $q=3$; $y_п=9$, $y_{п.уд}=10$; $y_з=9$.

зы — P_2, начало 3-й фазы — P_3, конец 1-й фазы — P_4, конец 2-й фазы — P_5, конец 3-й фазы — P_6.

На рис. 77 приведена схема стержневой волновой обмотки с данными, как по схеме рис. 76. Разница между этими схемами заключается лишь в том, что на рис. 77 выполнена схема с удлиненными переходами, а перемычки сдвинуты на четыре паза с сохранением симметрии. Составление схем стержневых волновых обмоток ротора более сложно, чем составление схем обмоток статора, поэтому при составлении схем обмоток ротора рекомендуется пользоваться таблицами по составлению схем роторных обмоток, составленных отдельно для обмоток с укороченными и отдельно с удлиненными переходами, при различном числе полюсов, пазов, шага обмотки (передний и задний), а также расположения начал и концов фаз и перемычек.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

СОКРАЩЕННЫЙ РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ. РАСЧЕТ ОБМОТКИ РОТОРА

19. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Расчет обмоток электродвигателей сводится к определению необходимого количества эффективных проводов в пазу и сечения обмоточного провода.

При расчете обмоток следует стремиться к тому, чтобы, не выходя из допустимых для данного типа электродвигателей магнитных и электрических нагрузок, полностью использовать заложенные в электродвигателе активные материалы — электротехническую сталь и обмоточную медь или алюминий. Электродвигатели старых серий в большинстве случаев имеют заниженные магнитные и электрические нагрузки, что при пересчете иногда дает возможность несколько увеличить мощность. Кроме того, применение обмоточных проводов с более тонкой и теплостойкой изоляцией и изоляционных материалов с более высокой нагревостойкостью также дает возможность увеличить мощность электродвигателя, а в отдельных случаях — и произвести замену медных обмоточных проводов алюминиевыми с возможным сохранением прежней мощности. Вопрос замены медных обмоточных проводов алюминиевыми при сохранении номинальной мощности имеет большое народнохозяйственное значение, поэтому этот вариант не должен упускаться. При пересчете следует учитывать, что увлечение большими магнитными и электрическими нагрузками в активных частях электродвигателя недопустимо, так как это ведет к чрезмерному нагреву электродвигателя и резкому сокращению срока службы его.

О величине магнитной и электрической нагрузки электродвигателя судят по величине магнитной индукции в воздушном зазоре и плотности тока в проводах обмотки. Магнитная индукция в воздушном зазоре и плотность тока в обмотке различных типов электродвигателей различны по величине и колеблются в больших пределах. Есть, например, электродвигатели с максимальными магнитными индукциями в воздушном зазоре, равными 3 500 *гс*, и электродвигатели с индукциями, рав-

ными 8 000—9 000 *гс.* Также встречаются электродвигатели с плотностью тока в обмотке статора, равной 2,1 *а* на 1 *мм*^{2} и 8,7 *а/мм*^{2}. Поэтому правильный выбор максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре и плотности тока в проводах обмотки представляет основную трудность при расчетах и пересчетах обмоток.

Магнитный поток, а значит, и величина максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре зависят от числа эффективных витков в фазе, что видно из формулы

$$E_{\text{ф}1} = 4{,}44\ k_{w1} w_1 f \Phi \cdot 10^{-8},\ \textit{в}, \tag{12}$$

где $E_{\text{ф}1}$ — э. д. с. фазы обмотки статора, *в*;

k_{w1} — обмоточный коэффициент, учитывающий укорочение шага обмотки статора и число катушек в катушечной группе;

w_1 — число эффективных витков в фазе обмотки статора;

f — частота переменного тока, *гц*;

Φ — магнитный поток, *мкс.*

Так как падение напряжения в статоре электродвигателя незначительно, э. д. с. $E_{\text{ф}1}$ можно приравнять к напряжению $U_{\text{ф}1}$ и для удобства анализа формулу (12) представить в следующем виде:

$$\Phi = \frac{U_{\text{ф}1} \cdot 10^8}{4{,}44 k_{w1} w_1},\ \textit{мкс}. \tag{13}$$

Из уравнения (13) видно, что при неизменных напряжении и частоте сети магнитный поток обратно пропорционален числу эффективных витков в фазе обмотки. Если число эффективных витков в фазе уменьшить, например, в 1,1 раза, то магнитный поток увеличится в 1,1 раза. Последствия от увеличения магнитного потока в 1,1 раза можно найти, анализируя приведенную ниже формулу, выражающую основной закон магнитной цепи:

$$\Phi = \frac{\textit{м.д.с.}}{R_m} = \frac{m_1 k_{w1} w_1 I_\mu}{R_m}, \tag{14}$$

где м. д. с. — магнитодвижущая сила;

R_m — магнитное сопротивление цепи магнитопровода;

m_1 — число фаз переменного тока обмотки статора;

k_{w1} — обмоточный коэффициент;

w_1 — число эффективных витков в фазе обмотки статора;

I_μ — намагничивающий ток, *а*.

Если мы будем считать сопротивление магнитной цепи R_m постоянной величиной для данного электродвигателя, то переменными величинами в правой части формулы (14) являются эффективные витки фазы w_1 и намагничивающий ток I_μ, т. е. переменной величиной является произведение $I_\mu w_1$, иначе говоря, н. с. холостого хода. Увеличение магнитного потока в 1,1 раза вызывает и увеличение н. с. холостого хода в 1,1 раза. Так как причиной увеличения магнитного потока в 1,1 раза явилось уменьшение числа эффективных витков в фазе обмотки статора w_1 в 1,1 раза, то, следовательно, для того чтобы н. с. холостого хода увеличились в 1,1 раза, намагничивающий ток должен возрасти в $1,1 \cdot 1,1 = 1,21$ раза, т. е. в $1,1^2$.

Таким образом, уменьшение эффективных витков в фазе обмотки статора вызывает увеличение магнитного потока в первой степени, а намагничивающего тока — в квадрате и, наоборот, увеличение числа эффективных витков в фазе обмотки статора вызывает уменьшение магнитного потока в первой степени, а намагничивающего тока — в квадрате.

Если при расчетах обмоток электрических машин незначительно отклоняться от расчетного числа эффективных витков в фазе, обусловленного нормальными магнитными нагрузками, то квадратичная зависимость между магнитным потоком (магнитной индукцией) и намагничивающим током будет соответствовать действительности, а при значительных отклонениях зависимость уже будет иной. Как известно, электротехническая сталь, применяемая для сердечников статоров и роторов электродвигателей, способна намагничиваться и изменять магнитную проницаемость; при этом насыщенная сталь резко уменьшает магнитную проницаемость. Уменьшение магнитной проницаемости активной стали вызывает увеличение магнитного сопротивления цепи магнитопровода в целом, что вызывает в свою очередь и рост н. с. холостого хода, т. е. и намагничивающего тока. Следовательно, значительное уменьшение эффективных

витков в фазе обмотки статора против расчетных вызывает увеличение намагничивающего тока из-за роста магнитного потока (магнитной индукции) и магнитного сопротивления цепи магнитопровода [см. формулу (14)].

Ниже приведены данные изменения тока холостого хода в зависимости от изменения числа эффективных проводов в фазе обмотки статора электродвигателя типа А62-6 мощностью 10 *квт*, напряжением 220/380 *в*, 37/21,5 *а*, 1 000 *об/мин* производства Ярославского электромеханического завода. Напряжение во время опыта поддерживалось постоянным (380 *в*), а изменению подвергались числа эффективных проводов в фазе обмотки статора, что вызывало соответствующие изменения величины магнитного потока (магнитной индукции) и тока холостого хода. Так как ток холостого хода трехфазного электродвигателя по величине мало отличается от намагничивающего тока:

$$I_{\text{х.х}} = (1{,}01 - 1{,}05)\, I_{\mu},$$

выводы из проведенного опыта можно отнести и к намагничивающему току.

Данные опыта подтвердили, что при увеличении максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре в 1,5 раза ток холостого хода увеличился не в 2,25 раза, как было бы при квадратичной зависимости, а в 6,25 раза; при увеличении магнитной индукции в 1,73 раза ток холостого хода увеличился в 12,5 раза; при увеличении магнитной индукции в 2 раза ток холостого хода увеличился в 28,8 раза, превысив номинальный ток в 10,7 раза.

При уменьшении магнитной индукции в 1,5 раза ток холостого хода уменьшился в 2,7 раза; при уменьшении магнитной индукции в 2 раза ток холостого хода уменьшился в 6,66 раза; при уменьшении магнитной индукции в 3 раза ток холостого хода уменьшился в 13,34 раза. Более интенсивно изменяется ток холостого хода при увеличении магнитной индукции против расчетной, так как здесь сказывается влияние магнитного насыщения стали.

Влияние изменения числа эффективных проводов на параметры электродвигателя

При уменьшении числа эффективных проводов в пазу против расчетного уменьшается и коэффициент мощно-

сти ($\cos\varphi$), так как при этом увеличивается реактивная составляющая потребляемого из сети тока на намагничивание магнитопровода; также уменьшается и к. п. д. электродвигателя из-за возрастания потерь в активной стали. Наряду с этим увеличиваются пусковой и максимальный моменты вращения, что является положительным моментом. При значительном снижении числа эффективных проводов против расчетного ток холостого хода и нагрев активных частей электродвигателя резко возрастают.

При увеличении числа эффективных проводов в пазу статора против расчетного $\cos\varphi$ увеличивается, но к. п. д., пусковой и максимальный моменты вращения уменьшаются. При значительном увеличении числа эффективных проводов в пазу (за счет уменьшения сечения провода) потери на нагрев обмотки значительно возрастают и резко снижается мощность электродвигателя.

Вторым, не менее важным вопросом при расчетах обмоток электродвигателей является выбор сечения обмоточных проводов обмотки. Сечение обмоточных проводов выбирают, исходя из допустимой плотности тока, качества изоляционных материалов, изоляции обмоточного провода и условий, в которых работает двигатель. Заниженная плотность тока ведет к недоиспользованию обмоточных материалов и занижению мощности электродвигателя, а чрезмерная плотность тока влечет за собой чрезмерный нагрев и сокращение срока службы электродвигателя. Между тем применение проводов с более нагревостойкой изоляцией позволяет увеличить плотность тока в проводах, повысить мощность электродвигателя или продолжительность его безаварийной работы. Улучшение условий охлаждения дает возможность повысить плотность тока в обмотке, а иногда и увеличить мощность электродвигателя.

При выборе плотности тока следует руководствоваться данными заводов-изготовителей для подобных типов электродвигателей, если при этом характер изоляции и марка проводов не меняются. При правильном выборе числа эффективных проводов в пазу статора и их сечения степень заполнения паза статора будет нормальной.

В технической литературе по ремонту электродвигателей и расчету обмоток нет единого метода для определе-

ления величины коэффициента заполнения паза. Одни авторы коэффициентом заполнения паза считают отношение площади всех изолированных проводов в пазу ко всей площади паза, другие — отношение площади всех изолированных проводов в пазу к площади паза за вычетом клина и пазовой изоляции. Второй метод определения коэффициента заполнения паза точнее, особенно для узких пазов. Первый метод менее точен, но проще и практичнее. Иногда пользуются условным значением коэффициента заполнения паза, вычисляемым по формуле

$$k_{\text{п}} = \frac{N d_{\text{из}}^2}{S_{\text{п. из}}},$$

где N — число проводов в пазу;
$d_{\text{из}}$ — диаметр провода с изоляцией;
$S_{\text{п.из}}$ — площадь паза за вычетом пазовой изоляции и клина.

Подсчитанный по этой формуле коэффициент заполнения паза не должен превышать 0,75.

При исчислении коэффициента заполнения паза по первому методу можно пользоваться следующими числовыми значениями[1]:

а) для трапециевидных пазов при однослойной обмотке

$$k_{\text{п}} = 0{,}37 \div 0{,}45;$$

то же при двухслойной обмотке

$$k_{\text{п}} = 0{,}35 \div 0{,}42;$$

б) для овальных пазов при однослойной обмотке

$$k_{\text{п}} = 0{,}42 \div 0{,}55;$$

то же при двухслойной обмотке

$$k_{\text{п}} = 0{,}37 \div 0{,}45.$$

Меньшее значение коэффициента заполнения паза принимают для двигателей меньшей мощности.

Замена одного провода двумя или несколькими эквивалентного сечения. При

[1] С. К. Андриевский и М. Н. Шапиро, Ремонт электрических машин и пускорегулирующей аппаратуры, Гостехиздат УССР, 1959.

выполнении обмотки статора часто наряду с параллельными ветвями приходится применять и параллельные провода. Замена одного провода двумя или несколькими параллельными проводами одинакового сечения производится довольно часто. Замена же одного провода двумя или несколькими параллельными проводами разных сечений встречается реже; о допустимости такой замены имеются разные мнения. Однако многочисленные опыты подтверждают, что при том числе витков, которое имеется в обмотках электродвигателей, токи в параллельных проводах практически распределяются пропорционально сечениям проводов и обратно пропорционально их активным сопротивлениям, что позволяет производить замену одного провода двумя или несколькими проводами разного сечения. Однако больше трех параллельных проводов применять не рекомендуется, так как при этом снижается коэффициент заполнения паза за счет дополнительной изоляции проводов н воздушных прослоек между проводами. В приложении 7 приведены варианты замены одного круглого провода двумя проводами, эквивалентными по их суммарному сечению.

20. РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА

Много методов и способов приближенных и сокращенных расчетов обмоток электродвигателей существует и применяется при пересчете электрических двигателей, однако не все они достаточно точны при определении расчетных параметров.

Одним из наиболее простых и достаточно точных методов расчета статорных обмоток электродвигателей мощностью до 100 *квт* является изложенный ниже.

Для определения числа эффективных проводов в пазу статора в основу расчета берется приближенная формула

$$N_{п} = \frac{2{,}6 U_{ф} p \cdot 10^{6}}{D_{в} L z B_{в}}, \qquad (15)$$

где $U_{ф}$ — фазное напряжение, *в*;

p — число пар полюсов;

$D_{в}$ — внутренний диаметр статора (диаметр расточки), *см*;

L — длина активной стали статора без вентиляционных каналов, *см*;

z — число пазов статора;

$B_в$ — максимальная индукция в воздушном зазоре, *гс*;

2,6 — коэффициент, учитывающий частоту $f=50$ *гц* и другие постоянные или принятые постоянными величины.

Расчет по этой формуле производится с учетом того, что обмоточный коэффициент принят равным 0,93, падение напряжения в обмотке — равным 4% величины напряжения, и синусоидальности формы поля.

При выполнении расчета электродвигателя, имеющего паспорт, но не имеющего обмотки, задаются величиной максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре с учетом типа электродвигателя.

Таблица 3

Мощность электродвигателя P, *квт*	Максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре $B_в$	
	гс	*вб/м²*
До 1,0	3 500—6 000	0,35—0,6
1,1—5,0	4 500—7 200	0,45—0,72
Свыше 5	5 000—8 000	0,5—0,8

Ориентировочно при выборе максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре можно пользоваться табл. 3.

При подсчете по формуле (15) числа эффективных проводов в пазу статора целесообразно пользоваться постоянными коэффициентами (табл. 4) для фазного напряжения 220 *в* при различном числе полюсов и числе пазов статора. Числовые значения постоянных коэффициентов приведены в табл. 4.

Коэффициенты таблицы включают в себя величину

$$C=\frac{2,6U_ф p}{z}.$$

Для определения числа эффективных проводов в пазу статора формула примет следующий вид:

$$N_п=\frac{C\cdot 10^6}{D_в L B_в}. \qquad (16)$$

Таблица 4

Постоянные коэффициенты для подсчета числа эффективных проводов в пазу статора электродвигателя при фазном напряжении 220 *в*

z \ $2p$	2	4	6	8
18	31,8	63,6	95,2	
24	23,8	47,6		95,2
27	21,2	42,4	63,6	84,8
30	19,1	38,2		76,4
36	15,9	31,8	47,6	63,6
48	11,9	23,8		47,6
54		21,2	31,8	42,4
72		15,9	23,8	31,8

Например, для электродвигателя с числом полюсов $2p=4$ и числом пазов $z=36$ количество эффективных проводов в пазу по формуле (16) равно

$$N_{п}=\frac{31,8\cdot 10^{6}}{D_{в}LB_{в}},$$

где число 31,8 взято из табл. 4.

Если быть уверенным, что величина максимальной индукции в воздушном зазоре выбрана правильно, то на этом можно было бы окончить определение числа эффективных проводов в пазу. Однако даже опытный расчетчик не в состоянии точно определить, какая величина индукции соответствует данному электродвигателю, так как она различна не только для различных типов электродвигателей, но даже при одном типе и колеблется в больших пределах. Так, в электродвигателях типа Р максимальная индукция в воздушном зазоре находится в пределах 5 600—7 200 *гс*, в электродвигателях типа АД — в пределах 5 000—8 300 *гс*, в электродвигателях типа МА-5000 — 9 300 *гс*, в электродвигателях типа ТТ-3800 — 7 200 *гс*, в электродвигателях типов МКА, МКБ — 4 500—7 900 *гс*. Не в меньших пределах величина максимальной индукции в воздушном зазоре колеблется и в электродвигателях иностранных фирм.

Поэтому при расчете обмоток следует проверять правильность выбранной величины максимальной индукции в воздушном зазоре с вычислением магнитных нагрузок в зубце и спинке активной стали статора.

Индукцию в зубце статора можно проверять по следующей формуле:

$$B_z = 3{,}5\frac{B_в D_в}{zb_z}, \quad (17)$$

где $B_в$ — максимальная индукция в воздушном зазоре, *гс*;
$D_в$ — внутренний диаметр статора, *см*;
z — число пазов статора;
b_z — расчетная ширина зубца; *см*;
3,5 — коэффициент, включающий в себя постоянные величины и коэффициент заполнения стали, принятый равным 0,9.

Расчетную ширину зубца берут между самым широким и самым узким размерами зубца, отступая на $^1/_3$ длины от узкой в сторону широкой.

Индукцию в спинке статора можно проверять по формуле

$$B_a = 0{,}6\frac{B_в D_в}{ph_c}, \quad (18)$$

где $B_в$ — максимальная индукция в воздушном зазоре, *гс*;
$D_в$ — внутренний диаметр статора, *см*;
p — число пар полюсов;
h_c — высота спинки статора, *см*;
0,6 — коэффициент, включающий в себя коэффициент магнитного перекрытия, принятый равным 0,7, коэффициент заполнения активной стали, принятый равным 0,9, и постоянные величины.

Вычисленные магнитные индукции в зубце статора должны находиться в пределах 13 000—17 000 *гс*, а в спинке статора — в пределах:

при $2p=2$ 12 000—17 000 *гс*;

$2p>2$ 10 000—15 000 *гс*.

Если индукция в зубце и спинке статора значительно отклоняется от указанных выше предельных величин, надлежит увеличить или уменьшить величину максимальной индукции в воздушном зазоре и в зависимости от полученных результатов окончательно подсчитать

число эффективных проводов в пазу. При пересчетё целесообразно применить способ пропорционального пересчета.

Если напряжение электродвигателя отличается от $U_ф=220$ *в*, принятого по табл. 4, то коэффициент по табл. 4 следует увеличить или уменьшить пропорционально изменению напряжения.

Например, при $U_ф=380$ *в* постоянный коэффициент умножается на 1,73, при $U_ф=127$ *в* делится на 1,73, а при $U_ф=290$ *в* умножается на $\frac{290}{220}=1,32$ и т. д.

При расчетах обмотки электродвигателя, не имеющего паспортных данных и старой обмотки, расчет приходится вести, задавшись наиболее вероятной скоростью вращения электродвигателя, исходя из конфигурации сердечника статора. Сравнительно большая высота спинки статора свидетельствует о быстроходности электродвигателя, а малая — о тихоходности. Выполнив расчет, можно по величине магнитной индукции в спинке статора определить, правильно ли задались скоростью вращения электродвигателя. Если магнитная индукция в спинке статора резко не выходит за пределы допустимых величин, то принятая при расчете скорость вращения соответствует паспортной. При малых индукциях в спинке статора расчет следует повторить, приняв более высокую скорость вращения, а при больших индукциях — наоборот. При определении приемлемости принятой индукции имеется в виду, что в воздушном зазоре и зубце статора она также не выходит из предела допустимых величин.

Для определения числа полюсов электродвигателя можно пользоваться формулой, позволяющей определить наименьшее число полюсов, допустимое в данном электродвигателе:

$$2p = 0,5\,\frac{D_в}{h_с}\text{*}, \qquad (19)$$

где $D_в$ — внутренний диаметр статора, *см*;
$h_с$ — высота спинки статора, *см*.

Полученный результат следует округлить до ближайшего четного числа.

---

* «Энергетика», 1959, № 7, статья В. В. Серкова.

Число полюсов электродвигателя можно точнее определить по формуле

$$2p = \frac{B_в D_в L}{B_a L_c h_c}, \qquad (20)$$

где $B_в$ — максимальная индукция в воздушном зазоре, *гс*;

$D_в$ — внутренний диаметр статора, *см*;

L — длина активной стали статора без вентиляционных каналов, *см*;

B_a — индукция в спинке статора, *гс*;

L_c — чистая длина активной стали статора без изоляции между листами сердечника, *см*;

h_c — высота спинки статора, *см*.

При определении числа полюсов электродвигателя по формуле (20) следует задаться максимальной индукцией в воздушном зазоре $B_в$ и индукцией в спинке статора B_a. Полученное число полюсов следует округлить до ближайшего четного числа и повторно определить величину индукции в спинке статора. Если индукция в спинке статора все же будет выходить за пределы допустимых величин, следует изменить максимальную магнитную индукцию в воздушном зазоре до величины, при которой индукция в спинке статора будет находиться в пределах норм. По формуле (17) определяют индукцию в зубце статора, а по формуле (16) — число эффективных проводов в пазу.

При проведении сокращенного расчета предполагалось, что ремонтируемый электродвигатель не имеет обмотки. Если же необходимо только проверить правильность старой обмотки электродвигателя, подлежащей замене, то повторных пересчетов для определения максимальной индукции в воздушном зазоре не требуется, так как она будет определена по фактическому числу эффективных проводов в пазу. Перерасчет потребуется только в случае, если у поступившего в ремонт электродвигателя неправильная обмотка, что может быть определено по величине магнитных нагрузок в воздушном зазоре, зубце и спинке статора.

Следующей стадией расчета будет определение сечения обмоточного провода новой обмотки.

Сечение одного эффективного провода с изоляцией определится по формуле

$$F_{из}=\frac{k_п S_п}{N_п}, \ мм^2, \qquad (21)$$

где $k_п$ — коэффициент заполнения паза;

$S_п$ — площадь паза;

$N_п$ — количество эффективных проводов в пазу.

Коэффициент заполнения паза принимается, исходя из данных, изложенных в предварительных сведениях к расчету.

Площадь паза легко подсчитать, сделав оттиск его на миллиметровой бумаге и построив на нем равновеликий прямоугольник.

Далее выбирают число параллельных ветвей и число параллельных проводов в зависимости от величины полученного при расчете сечения одного эффективного провода с изоляцией.

Сечение одного элементарного провода с изоляцией подсчитаем по формуле

$$s_{1из}=\frac{F_{из}}{ab}, \qquad (22)$$

где a — число параллельных ветвей;

b — число параллельных проводов.

Число параллельных проводов и параллельных ветвей выбирается так, чтобы элементарный провод свободно входил в шлиц паза статора.

Диаметр элементарного изолированного провода определяется или по таблице перевода сечений в диаметры, или по формуле

$$d_{из}=1{,}13\sqrt{s_{1из}}.$$

Диаметр голого провода определяется методом вычитания от изолированного провода толщины его изоляции:

$$d=d_{из}-\delta_{из},$$

где $\delta_{из}$ — двусторонняя толщина изоляции.

Величину $\delta_{из}$ можно брать из каталогов и справочников или по приложению 4.

По диаметру голого провода найдем его сечение.

Если нет уверенности в правильном выборе коэффициента заполнения паза, можно один паз статора заполнить пазовой изоляцией и проводом полученного сечения и подсчитать фактическое количество проводов. Если расчетное количество элементарных проводов не вмещается в паз, необходимо сечение провода уменьшить и, наоборот, если паз не заполняется, следует сечение увеличить. В обоих случаях производится перерасчет сечения. Практически это выполняется так.

Заполняют данным проводом изолированный паз, оставив место для клина.

Подсчитывают количество вложенных элементарных проводов.

Вычисляют суммарную площадь, занятую медью, перемножением количества элементарных проводов на их сечение.

Полученную площадь меди делят на расчетное количество элементарных проводов с изоляцией.

По полученному сечению элементарного провода находят его диаметр по таблице или расчету, где $d=\sqrt{\frac{4}{\pi}\cdot s_1}=1,13\sqrt{s_1}$.

При переходе на иной вид изоляции провода вычисляют не суммарную площадь меди, а суммарную площадь изолированных проводов, разделив которую на расчетное количество элементарных проводов, определяют сечение элементарного провода с изоляцией, а за вычетом двусторонней толщины изоляции — и диаметр голого провода.

Зная сечение обмоточного провода, можно вычислить плотность тока и сравнить ее с допустимой для электродвигателей данного типа:

$$\Delta=\frac{I_ф}{abs_1}, \qquad (23)$$

где $I_ф$ — фазный ток электродвигателя (при соединении обмотки звездой $I_ф=I_л$; при соединении треугольником $I_ф=I_л:\sqrt{3}$);

a — число параллельных ветвей;

b — число параллельных проводов;

s_1 — сечение элементарного провода;

$I_л$ — линейный ток.

Допустимую плотность тока можно определить по табл. 5.

Для электродвигателей закрытого и взрывобезопасного исполнений плотности тока берутся ближе к нижнему пределу. Для обмоток фазных роторов плотность тока берется в 1,35—1,45 раза большей, чем для обмоток статора.

Таблица 5

Рекомендуемые плотности тока

Мощность электродвигателя, *квт*	Синхронная скорость вращения, *об/мин*	Плотность тока в обмотке статора, *а/мм²*
0,1—1,0	3 000	4,5—6,8
	1 500	4,0—6,3
1,1—5,0	3 000	5,5—7,5
	1 500	4,8—7,2
	1 000	4,5—6,7
5,1—10,0	3 000	5,0—7,2
	1 500	4,5—7,0
	1 000	4,3—6,5
	750	4,1—6,2
10,1—25,0	3 000	5,0—7,0
	1 500	4,5—6,5
	1 000	4,3—6,3
	750	4,1—6,0
25,1—100	3 000	4,8—6,6
	1 500	4,3—6,0
	1 000	4,0—5,5
	750	3,8—5,3

Если мощность электродвигателя неизвестна, то задаются плотностью тока и определяют фазный ток электродвигателя, после чего вычисляют мощность электродвигателя:

$$P = \frac{3U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \cos\varphi\eta}{1\,000}, \ \textit{квт}, \qquad (24)$$

где $U_{\text{ф}}$ — фазное напряжение;

$I_{\text{ф}}$ — фазный ток.

Косинус φ и к. п. д. берутся в зависимости от мощности и скорости вращения электродвигателя. Таблицы значений косинуса φ и к. п. д. приведены в приложениях 6 и 7.

 5 и 6

21. РАСЧЕТ ОБМОТКИ РОТОРА

При ремонте расчет обмотки фазного ротора производят, если в нем отсутствует старая обмотка или при необходимости изменения скорости вращения.

При пересчете обмотки статора на новое напряжение не требуется производить пересчета обмотки ротора; напряжение на его кольцах, а также фазный ток будут прежними. Порядок расчета фазного ротора при отсутствии обмотки в нем следующий: э. д. с. фазного ротора при режиме короткого замыкания равна

$$E_{\text{ф}2} = E_{\text{ф}1} \frac{k_{w2} w_2}{k_{w1} w_1}, \ в, \qquad (25)$$

где $E_{\text{ф}2}$ — фазная э. д. с. ротора;

$E_{\text{ф}1}$ — фазная э. д. с. статора;

k_{w2} — обмоточный коэффициент обмотки ротора;

k_{w1} — обмоточный коэффициент обмотки статора;

w_2 — число эффективных витков в фазе обмотки ротора;

w_1 — число эффективных витков в фазе обмотки статора.

Если пренебречь падением напряжения в обмотках статора и ротора, которые незначительны по величине, и обмоточные коэффициенты обмоток статора и ротора приравнять, что также допустимо, то для определения фазного напряжения на разомкнутых кольцах ротора можно применить следующую формулу:

$$U_{\text{ф}2} = U_{\text{ф}1} \frac{w_2}{w_1}, \ в, \qquad (26)$$

откуда

$$w_2 = \frac{w_1 U_{\text{ф}2}}{U_{\text{ф}1}}, \qquad (27)$$

где $U_{\text{ф}2}$ — фазное напряжение на кольцах ротора;

$U_{\text{ф}1}$ — фазное напряжение статора.

Поскольку в формулах (26) и (27) неизвестными являются фазное напряжение на кольцах ротора и число эффективных витков в фазе обмотки ротора, величиной напряжения обмотки ротора следует задаться. При выборе линейного напряжения на кольцах ротора можно пользоваться табл. 6.

Таблица 6

Величина линейного напряжения на кольцах ротора в зависимости от мощности электродвигателя

Вид обмотки	Линейное напряжение на кольцах ротора, *в*	
	$P=3\div20$ *квт*	$P=20\div100$ *квт*
Волновая стержневая	100—290	150—290
Катушечная	100—290	220—340

Фазное напряжение обмотки ротора при соединении звездой будет равно

$$U_{ф2}=\frac{U_{л2}}{\sqrt{3}},\ в.$$

Число эффективных витков в фазе обмотки статора определяют по формуле

$$w_1=\frac{N_{п1}z_1}{2m_1}=\frac{N_{п1}z_1}{2\cdot3}=\frac{N_{п1}z_1}{6}, \qquad (28)$$

где w_1 — число эффективных витков в фазе обмотки статора;

$N_{п1}$ — число эффективных проводов в пазу статора;

z_1 — число пазов статора;

m_1 — число фаз обмотки статора.

Вычислив число эффективных витков в фазе обмотки ротора, определяют число эффективных проводов в пазу ротора по формуле

$$N_{п2}=\frac{2m_2w_2}{z_2}=\frac{2\cdot3w_2}{z_2}=\frac{6w_2}{z_2}, \qquad (29)$$

где $N_{п2}$ — число эффективных проводов в пазу ротора;

m_2 — число фаз обмотки ротора;

w_2 — число эффективных витков в фазе обмотки ротора;

z_2 — число пазов ротора.

Определяют ток ротора:

$$I_{ф2}=(0{,}9\div0{,}85)\,I_{ф1}\frac{w_1}{w_2},\ a, \qquad (30)$$

где $I_{ф2}$ — фазный ток ротора;

$I_{ф1}$ — фазный ток статора.

Задаются плотностью тока в обмотке ротора, исходя из соображений, изложенных в предварительных сведениях к расчету, выбирают число параллельных ветвей и параллельных проводов и определяют сечение элементарного провода обмотки ротора:

$$s_2 = \frac{I_{ф2}}{a_2 b_2 \Delta_2},\ мм^2, \qquad (31)$$

где s_2 — сечение элементарного провода обмотки ротора, $мм^2$;

a_2 — число параллельных ветвей обмотки ротора;

b_2 — число параллельных проводов обмотки ротора;

Δ_2 — плотность тока в обмотке ротора, $а/мм^2$.

По сечению определяют диаметр провода, где $d = \sqrt{\frac{4}{\pi} s_2}$, или по справочной таблице. Диаметр изолированного провода равен

$$d_{из2} = d_2 + \delta_{из},$$

где $d_{из2}$ — диаметр изолированного провода обмотки ротора;

d_2 — диаметр провода обмотки ротора;

$\delta_{из}$ — двусторонняя толщина изоляции провода.

По диаметру изолированного провода определяют и его сечение. Для определения коэффициента заполнения паза ротора снимают при помощи бумаги оттиск паза и на нем строят равновеликий прямоугольник и вычисляют площадь паза $S_{п2}$ и коэффициент его заполнения, пользуясь формулой

$$k_{п2} = \frac{s_{из2} N}{S_{п2}}, \qquad (32)$$

где N — количество элементарных проводов в пазу ротора.

Коэффициент заполнения паза должен находиться в пределах величин, указанных в предварительных сведениях к расчету. Для стержневой обмотки коэффициент заполнения паза обычно равен 0,46—0,55. При значительных отклонениях коэффициента заполнения паза от

нормальной величины следует заполнить один паз ротора проводом сечения, полученного при расчете, и подсчитать число проводов. Если расчетное число элементарных проводов не вместилось в паз, следует диаметр провода уменьшить; если же не заполняет паз, диаметр провода следует увеличить.

22. ПЕРЕСЧЕТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ДРУГУЮ СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ

Чтобы изменить скорость вращения электродвигателя, необходимо изменить число полюсов в статоре и фазном роторе. Это достигается изменением шага и числа катушек в катушечной группе в обмотках статора и фазного ротора при перемотке электродвигателя.

Перевод электродвигателя на другое число полюсов при неизменном напряжении, частоте и индукции в воздушном зазоре связан с изменением магнитного потока, который изменяется обратно пропорционально числу полюсов и прямо пропорционально скорости вращения. Если четырехполюсный электродвигатель переделать на двухполюсный, т. е. уменьшить число полюсов в 2 раза, то полюсное деление τ и сечение в воздушном зазоре[1] также увеличатся в 2 раза, в результате чего при прежнем значении максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре магнитный поток увеличится в 2 раза. Так как напряжение и частота остаются без изменения, с увеличением магнитного потока, приходящегося на полюс, в 2 раза необходимо уменьшить и число эффективных проводов в пазу статора в 2 раза, что дает возможность сечение обмоточного провода увеличить в 2 раза и соответственно увеличить мощность.

Обозначим скорость вращения, мощность, число эффективных проводов в пазу и сечение эффективного провода принятыми ранее буквами с индексом «ст» для старых данных и индексом «нов» для новых данных и установим соотношение между ними.

Число эффективных проводов в пазу при переходе на новую скорость вращения изменяется пропорциональ-

---

[1] Сечением в воздушном зазоре называется поверхность расточки статора, равная произведению полюсного деления τ на расчетную длину статора L_i и коэффициент магнитного перекрытия α. Расчетная длина равна полусумме длин сердечника статора с вентиляционными каналами и без них.

но старой скорости вращения и обратно пропорционально новой скорости вращения:

$$N_{\text{п.нов}} = N_{\text{п.ст}} \frac{n_{\text{ст}}}{n_{\text{нов}}}. \qquad (33)$$

При переходе на новую скорость вращения мощность изменяется примерно пропорционально новой скорости вращения и обратно пропорционально старой скорости вращения:

$$P_{\text{нов}} \approx P_{\text{ст}} \frac{n_{\text{нов}}}{n_{\text{ст}}}. \qquad (34)$$

Учитывая изменения коэффициента мощности и к. п. д. при новой скорости вращения электродвигателя, его новая мощность будет равна

$$P_{\text{нов}} \approx P_{\text{ст}} \frac{n_{\text{нов}} \cos \varphi_{\text{нов}} \eta_{\text{нов}}}{n_{\text{ст}} \cos \varphi_{\text{ст}} \eta_{\text{ст}}}. \qquad (35)$$

Сечение эффективного провода при переходе на новую скорость вращения изменяется пропорционально старому числу эффективных проводов в пазу и обратно пропорционально новому числу эффективных проводов в пазу:

$$F_{\text{нов}} = F_{\text{ст}} \frac{N_{\text{п.ст}}}{N_{\text{п.нов}}}. \qquad (36)$$

Необходимо подчеркнуть, что пользоваться приведенными выше формулами (33), (34), (35) и (36) можно лишь в том случае, если максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре оставлена при пересчете электродвигателя на другую скорость вращения неизменной, что не всегда удается. Электродвигатели в большинстве случаев конструируют так, чтобы полностью использовать активную сталь, не допуская резерва для значительного увеличения магнитных нагрузок. При уменьшении скорости вращения электродвигателя затруднений для сохранения прежней величины максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре не встречается; число полюсов увеличится, полюсное деление τ уменьшится, магнитный поток уменьшится. Уменьшение магнитного потока вызовет соответственное увеличение числа эффективных проводов в пазу, уменьшение эффективного сечения провода и снижение мощности электродвигателя. Магнитная индукция в зубце

статора останется прежней, а магнитная индукция в спинке сердечника статора снизится.

При увеличении скорости вращения в $1^1/_2$ и особенно в 2 раза часто нельзя сохранить максимальную магнитную индукцию в воздушном зазоре неизменной из-за сильно возрастающей магнитной индукции в спинке статора. В этих случаях максимальную магнитную индукцию в воздушном зазоре уменьшают до такой величины, при которой магнитная индукция в спинке статора не будет выходить за пределы допустимых величин. Уменьшение максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре повлечет за собой увеличение числа эффективных проводов в пазу против величины, вычисленной по формуле (33), почему и сечение эффективного провода придется уменьшить; в связи с этим снизится и мощность электродвигателя по сравнению с величиной, вычисленной по формуле (35). Поэтому при пересчете электродвигателей на бо́льшую скорость вращения необходимо производить расчет магнитных нагрузок и не ограничиваться только формулами (33), (34), (35) и (36), которыми в основном можно пользоваться при уменьшении скорости вращения электродвигателя.

Ход расчета обмотки фазного ротора при переходе на другие скорости вращения показан в примере расчетов.

При пересчетах электродвигателей на другую скорость вращения необходимо учитывать и следующее.

При снижении скорости вращения ухудшается охлаждение электродвигателя, в связи с чем полученную по формуле (35) мощность рекомендуется уменьшить на 10—15%. При увеличении скорости вращения плотность тока можно повысить на 10—15% и соответственно мощность электродвигателя.

При переходе на новую скорость вращения может измениться номинальный вращающий момент электродвигателя, поэтому в таких случаях следует предварительно рассчитать достаточность момента для данной нагрузки.

Для определения номинального вращающего момента электродвигателя применяется следующая формула:

$$M = 975\,\frac{P}{n},\ кГ \cdot м, \qquad (37)$$

где P — номинальная мощность электродвигателя, *квт*;
n — скорость вращения электродвигателя, *об/мин*.

Чтобы не допустить снижения номинального вращающего момента при переходе на другую скорость вращения и повысить пересчитанную на новую скорость вращения мощность электродвигателя, целесообразно применить провод с более тонкой и более нагревостойкой изоляцией.

При увеличении скорости вращения электродвигателя нагрев подшипников увеличивается, а при уменьшении скорости вращения он уменьшается. Следовательно, при увеличении скорости вращения электродвигателя потребуется усилить контроль за температурой подшипников.

При переходе на бо́льшую скорость вращения необходимо проверить окружную скорость ротора по формуле

$$v_р = \frac{\pi D_2 n}{60 \cdot 1\,000},\ м/сек, \qquad (38)$$

где $v_р$ — окружная скорость ротора, *м/сек*;
D_2 — диаметр ротора, *мм*.

Окружная скорость фазного ротора не должна превышать 30—40 *м/сек*, а короткозамкнутого 40—60 *м/сек*.

При переходе на бо́льшую скорость вращения необходимо усилить бандаж фазного ротора.

При перемотке обмоток электродвигателя на бо́льшую скорость вращения увеличивается шаг обмотки, что способствует увеличению длины вылета лобовых частей. Поэтому следует проверить, особенно при переходе на 3 000 *об/мин*, допускает ли глубина подшипниковых щитов размещение удлиненных лобовых частей обмотки статора. В противном случае можно взять укорочение обмотки по пазам больше, чем 0,8 y, и не ниже 0,7 y.

23. ПЕРЕСЧЕТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЗАМЕНЕ МАТЕРИАЛА ОБМОТОЧНОГО ПРОВОДА

При ремонте электродвигателей иногда приходится производить замену материала обмоточных проводов, например вместо медных проводов применять алюминиевые и наоборот.

Удельное электрическое сопротивление алюминиевых проводов больше медных в 1,63 раза ($\rho_{мед}=0{,}0175$; $\rho_{ал}=0{,}0285$ *ом·мм²/м*). Поэтому замена медного про-

вода алюминиевым того же сечения приведет или к снижению мощности электродвигателя в 1,63 раза, или при сохранении мощности к увеличению потерь в обмотке статора электродвигателя, более чем на 63%, что снизит к. п. д. электродвигателя, увеличит нагрев обмотки и сократит срок его службы.

Чтобы избежать указанных выше нежелательных последствий, следует максимально увеличить сечение алюминиевого провода за счет:

1) применения более тонкой изоляции проводов и изоляции паза;

2) повышения коэффициента заполнения паза статора;

3) выполнения обмотки в один провод вместо двух параллельных проводов и повышения магнитных нагрузок, если расчетом будет установлено, что они занижены.

Проведенные некоторыми заводами и научно-исследовательскими институтами исследовательские работы подтвердили возможность замены медных обмоточных проводов алюминиевыми даже без снижения мощности для некоторых старых типов электродвигателей и единой серии (А и АО) мощностью до 100 *квт*. Для замены провода в каждом отдельном случае необходимо проводить пересчет электродвигателя по следующему методу.

Пример. Требуется пересчитать электродвигатель для замены медного провода алюминиевым.

Технические данные электродвигателя и данные замеров:

Тип электродвигателя	А51-4
Мощность	$P = 4{,}5$ *квт*
Напряжение	$U = 220/380$ *в*
Ток	$I = 16{,}3/9{,}4$ *а*
Скорость вращения	$n = 1\,500$ *об/мин*
Внутренний диаметр статора	$D_в = 152$ *мм*
Длина активной стали статора (без вентиляционных каналов)	$L = 90$ *мм*
Число пазов статора	$z = 36$
Ширина зубца статора	$b_z = 7$ *мм*
Высота спинки статора	$h_c = 24{,}5$ *мм*
Число эффективных проводов в пазу	$N_п = 32$
Провод ПЭЛБО ⌀ 1,62 в один провод, обмотка однослойная без параллельных ветвей, сечение эффективного провода	$F = 2{,}06$ *мм*^{2}
Ротор — короткозамкнутый	

Вычисляют плотность тока в обмотке статора прн медном проводе:

$$\Delta_{м} = \frac{I}{F} = \frac{9,4}{2,06} = 4,56 \ а/мм^2.$$

Вычисляют равноценную по нагреву плотность тока для алюмнниевых проводов:

$$\Delta_{ал} = \Delta_{м} \frac{\rho_{м}}{\rho_{ал}} = 4,56 \frac{0,0175}{0,0285} = 2,81 \ а/мм^2.$$

Вычисляют магнитные нагрузки:

$$B_{в} = \frac{C \cdot 10^6}{D_{в} L N_{п}} = \frac{31,8 \cdot 10^6}{15,2 \cdot 9,0 \cdot 32} = 7\,300 \ гс;$$

$$B_z = 3,5 \frac{B_{в} D_{в}}{z b_z} = 3,5 \frac{7\,300 \cdot 15,2}{36 \cdot 0,7} = 15\,500 \ гс;$$

$$B_a = 0,6 \frac{B_{в} D_{в}}{p h_{c}} = 0,6 \frac{7\,300 \cdot 15,2}{2 \cdot 2,45} = 13\,600 \ гс.$$

Таким образом, увеличивать сечение алюминиевого провода за счет уменьшения числа эффективных проводов в пазу и соответствующего увеличения магнитных нагрузок нецелесообразно.

Вычисляют коэффициент заполнения паза статора.

Площадь паза, замеренная или по каталогу,

$$S_{п} = 206,5 \ мм^2.$$

Диаметр медного провода с изоляцией

$$d_{из} = d + \delta_{из} = 1,62 + 0,21 = 1,83 \ мм.$$

Сечение эффективного провода с изоляцией

$$F_{из} = \frac{\pi d_{из}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1,83^2}{4} = 2,64 \ мм^2.$$

Сечение всех эффективных проводов с изоляцией

$$F_{из} N_{п} = 2,64 \cdot 32 = 84,5 \ мм^2.$$

Коэффициент заполнения паза

$$k_{п} = \frac{F_{из} N_{п}}{S_{п}} = \frac{84,5}{206,5} = 0,41.$$

Таким образом, коэффициент заполнения паза можно увеличить за счет лучшего использования паза и меньшей жесткости алюминиевых проводов по сравнению с медными. Возьмем $k'_{п} = 0,45$.

Пересчитывают сечение эффективного провода с изоляцией, учитывая новый коэффициент заполнения паза:

$$F'_{из}=F_{из}\frac{k'_п}{k_п}=2,64\frac{0,45}{0,41}=2,9\ мм^2,$$

что соответствует диаметру $d'_{из}=1,95$ *мм*.

Выбирают алюминиевый провод марки ПЭВА-2 диаметром $d'=1,88$ *мм* с изоляцией $\delta_{из}=0,08$ *мм*.

Сечение провода $F'=2,78$ *мм*^{2}.

Примечание. При выборе диаметра изолированного провода необходимо учитывать ширину шлица паза.

Вычисляют ток, исходя из сечения алюминиевого провода и вычисленной ранее плотности тока для алюминиевого провода:

$$I'=\Delta_{ал}F'=2,81\cdot 2,78=7,8\ a.$$

Вычисляют величину новой мощности электродвигателя:

$$P'=P\frac{I'}{I}=4,5\frac{7,8}{9,4}=3,73\ квт.$$

Вычисляют, во сколько раз уменьшена мощность электродвигателя при переходе на алюминиевый обмоточный провод:

$$\frac{P'}{P}=\frac{4,5}{3,73}=1,205,\ т.\ е.\ на\ 20,5\%.$$

Учитывая, что в данном примере применена изоляция провода типа винифлекс, для которой допустимое превышение температуры составляет 85° С, следует считать возможным повысить плотиость тока в обмотке статора данного электродвигателя на 20%, установив номинальную мощность его 4,5 *квт*.

Пересчитанный электродвигатель в связи с заменой медного обмоточного провода алюминиевым может работать при мощности 4,5 *квт*; при этом незначительно возрастут его потери из-за увеличения нагрева обмотки статора и соответственно несколько снизится к. п. д.

24. ПЕРЕСЧЕТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЧАСТОТЫ

При пересчете электродвигателя на другую частоту следует руководствоваться формулой (12), которую можно записать в следующем виде, формула (39):

$$U\approx E=kf_1\Phi, \qquad (39)$$

или

$$\Phi=\frac{E}{kf_1}\approx\frac{U}{kf_1},$$

где k — коэффициент, включающий в себя постоянные величины и величины, зависящие от данных обмотки;

f_1 — частота питающей сети;
Ф — магнитный поток;
U — напряжение сети.

Из приведенных формул видно, что при изменении частоты в сети и сохранении обмоточных данных у электродвигателя следует в таком же соотношении изменить напряжение сети и тем самым сохранить неизменным магнитный поток. В этом случае, т. е. при изменении напряжения пропорционально изменению частоты, электродвигатель при сохранении неизменным момента вращения будет работать с практически неизменными значениями к. п. д., $\cos\varphi$ и перегрузочной способности.

В таком режиме работает, например, электроверетено ЭВ-3, предназначенное для прядения и кручения вискозного волокна. При работе электроверетена со скоростью вращения 8 000 *об/мин* (синхронных) питающая сеть имеет частоту 133 *гц* и напряжение 104 *в*, а при работе электроверетена со скоростью 9 000 *об/мин* (синхронных) питающая сеть должна иметь частоту 150 *гц* и напряжение 117 *в*.

При переходе на другую частоту без изменения напряжения сети следует изменить обмоточные данные статора электродвигателя и этим оставить магнитный поток прежним, что следует из формулы (40):

$$\Phi \equiv \frac{U}{fw}. \qquad (40)$$

Пересчет электродвигателя на другую частоту при постоянном напряжении производят по формулам:

а) число эффективных витков в фазе обмотки статора

$$w_{нов} = w_{ст} \frac{f_{ст}}{f_{нов}};$$

б) число эффективных проводов в пазу

$$N_{п.нов} = N_{п.ст} \frac{f_{ст}}{f_{нов}};$$

в) сечение эффективного провода

$$F_{нов} = F_{ст} \frac{f_{нов}}{f_{ст}};$$

г) мощность при новой частоте по формуле (41)

$$P_{нов} = P_{ст} \frac{f_{нов}}{f_{ст}}. \qquad (41)$$

При значительном повышении частоты (200—500 *гц*) необходимо несколько ограничить повышение мощности (на 15—35%) вследствие снижения к. п. д. из-за увеличения потерь в меди (явление поверхностного эффекта) и потерь в активной стали. Также необходимо учитывать изменение условий охлаждения при разных скоростях вращения.

Так как переход на повышенную частоту влечет за собой увеличение скорости вращения электродвигателя, то при подобных пересчетах необходимо проверять окружную скорость ротора по формуле (38).

25. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

Пример. Требуется произвести сокращенный расчет обмотки статора электродвигателя с короткозамкнутым ротором, не имеющего технического паспорта обмотки.

Данные электродвигателя:

Скорость вращения	$n = 1\,500$ *об/мин*
Напряжение	$U = 220/380$ *в*
Результаты замеров:	
Внутренний диаметр статора	$D_в = 145$ *мм*
Длина активной стали статора (без вентиляционных каналов)	$L = 200$ *мм*
Число пазов статора	$z = 36$
Ширина зубца статора (расчетная) .	$b_z = 6{,}8$ *мм*
Высота спинки статора	$h_c = 28$ *мм*

Примечания: 1. Замеры производят в миллиметрах, а запись размеров в формулы для расчета производят в сантиметрах.

2. Измерение ширины зубца и спинки статора производят с точностью до 0,1 *мм.*

Задаются максимальной магнитной индукцией в воздушном зазоре $B_в = 6\,900$ *гс* и по табл. 4 постоянных коэффициентов для $2p=4$ и $z=36$ пазов определяют величину C и число эффективных проводов в пазу статора:

$$N_п = \frac{C \cdot 10^6}{D_в L B_в} = \frac{31{,}8 \cdot 10^6}{14{,}5 \cdot 20{,}0 \cdot 6\,900} = 15{,}9.$$

Число эффективных проводов в пазу статора принимается $N_п = 16$, а величину максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре не меняют в связи с небольшой разницей между взятыми эффективными проводами в пазу и полученными расчетами.

Определяют магнитную индукцию в зубце статора:

$$B_z = 3{,}5\frac{B_в D_в}{z b_z} = 3{,}5\frac{6\,900\cdot 14{,}5}{36\cdot 0{,}68} = 14\,200\ гс.$$

Определяют магнитную индукцию в спинке статора:

$$B_a = 0{,}6\frac{B_в D_в}{p h_c} = 0{,}6\frac{6\,900\cdot 14{,}5}{2\cdot 2{,}8} = 10\,700\ гс.$$

Сравнивая полученные магнитные индукции с допустимыми по табл. 3, видим, что число эффективных проводов в пазу можно уменьшить и этим увеличить индукцию.

Окончательно число эффективных проводов в пазу принимают $N_п = 15$ и пересчитывают магнитные индукции:

$$B_в = \frac{6\,900\cdot 16}{15} = 7\,400\ гс;$$

$$B_z = \frac{14\,200\cdot 16}{15} = 15\,200\ гс;$$

$$B_a = \frac{10\,700\cdot 16}{15} = 11\,400\ гс.$$

По оттиску паза определяют сечение паза $S_п$, задаются коэффициентом заполнения паза $k_п$ и определяют сечение одного эффективного провода с изоляцией:

$$S_п = 125\ мм^2.$$

Для трапециевидного паза и однослойной обмотки

$$k_п = 0{,}41;$$

$$F_{из} = \frac{k_п S_п}{N_п} = \frac{0{,}41\cdot 125}{15} = 3{,}42\ мм^2.$$

Определяют сечение одного элементарного провода с изоляцией, приняв число параллельных ветвей $a = 1$ и число параллельных проводов $b = 2$:

$$s_{1из} = \frac{F_{из}}{ab} = \frac{3{,}42}{1\cdot 2} = 1{,}71\ мм^2.$$

Определяют диаметр одного элементарного провода с изоляцией по переводной таблице или вычислением:

$$d_{из} = 1{,}47\ мм.$$

Определяют диаметр голого провода марки ПЭЛБО:

$$d = d_{из} - \delta_{из} = 1{,}47 - 0{,}21 = 1{,}26\ мм,$$

а по ГОСТ $d = 1{,}25$ *мм*, что соответствует сечению $s_1 = 1{,}23$ *мм*^{2}.

Задаются плотностью тока для медных проводов $\Delta=6$ *а/мм*² и вычисляют фазный ток электродвигателя:

$$I_ф=\Delta b s_1=6\cdot 2\cdot 1{,}23=14{,}7\ а.$$

По приложению 6 выбирают к. п. д. и $\cos\varphi$, где для электродвигателя 6—8 *квт* к. п. д.$=0{,}87$, $\cos\varphi=0{,}86$ и мощность равна:

$$P=\frac{3U_ф I_ф \cos\varphi\eta}{1\,000}=\frac{3\cdot 220\cdot 14{,}7\cdot 0{,}86\cdot 0{,}87}{1\,000}=7{,}3\ квт.$$

Пример. Произвести поверочный расчет обмотки статора электродвигателя со следующими техническими данными: мощность 9,6 *квт*; напряжение 220/380 *в*; ток 34,3/19,8 *а*; скорость вращения 1 000 *об/мин*; ротор — короткозамкнутый.

Данные замеров:

Внутренний диаметр статора	$D_в=230$ *мм*
Длина активной стали статора (без вентиляционных каналов)	$L=156$ *мм*
Число пазов статора	$z=54$
Ширина зубца статора	$b_z=5{,}2$ *мм*
Высота спинки статора	$h_c=21$ *мм*
Число элементарных проводов в пазу	$N=32$

Провод ПБД ⌀ 1,74 *мм* параллельно в два провода. Шаг по пазам $y=1$—9, обмотка — двухслойная.

Величина максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре

$$B_в=\frac{C\cdot 10^6}{D_в L N_п}=\frac{31{,}8\cdot 10^6}{23{,}0\cdot 15{,}6\cdot 16}=5\,500\ гс.$$

Так как элементарных проводов в пазу 32, а обмотка выполнена в два параллельных провода без параллельных ветвей, то число эффективных проводов в пазу $N_п=16$ (при наличии, например, трех параллельных ветвей и двух параллельных проводов число эффективных проводов в пазу было бы $\frac{32}{3\cdot 2}=5{,}33$).

Магнитная индукция в зубце статора

$$B_z=3{,}5\frac{B_в D_в}{z b_z}=3{,}5\frac{5\,500\cdot 23}{54\cdot 0{,}52}=15\,800\ гс.$$

Магнитная индукция в спинке статора

$$B_a=0{,}6\frac{B_в D_в}{p h_c}=0{,}6\frac{5\,500\cdot 23}{3\cdot 2{,}1}=12\,100\ гс.$$

Плотность тока в обмотке статора

$$\Delta=\frac{I_ф}{a b s_1}=\frac{19{,}8}{1\cdot 2\cdot 2{,}378}=4{,}2\ а/мм^2.$$

где $I_ф$ — фазный ток обмотки статора, равный при соединении звездой линейному току;

a — число параллельных ветвей в обмотке статора;

b — число параллельных проводов в обмотке статора;

s_1 — сечение элементарного провода обмотки статора.

Так как магнитные индукции и плотность тока здесь не выходят за пределы допустимых величин (см. табл. 3 и 5), число эффективных проводов в пазу обмотки статора и диаметр провода соответствуют данным этого электродвигателя.

Пример. Требуется перемотать электродвигатель с напряжением 127/220 на 220/380 *в*.

Данные электродвигателя: мощность 37 *квт*; напряжение 127/220 *в*; ток 230/133 *а*; скорость вращения 750 *об/мин*; ротор — фазный; обмотки статора и ротора соединены звездой.

Данные замеров:

Внутренний диаметр статора	$D_в = 365$ *мм*
Длина активной стали статора (без вентиляционных каналов)	$L = 210$ *мм*
Число пазов статора	$z = 72$
Число элементарных проводов в пазу	$N = 21$
Число параллельных ветвей	$a = 2$
Провод—ПБД ∅ 2,63 *мм*, сечение . .	$s_1 = 5{,}432$ *мм²*
Число параллельных проводов	$b = 3$
Шаг по пазам 1—10; обмотка—однослойная	

Число эффективных проводов в пазу обмотки статора

$$N_{п.ст} = \frac{N}{ab} = \frac{21}{2\cdot 3} = 3{,}5.$$

Необходимое число эффективных проводов в пазу обмотки статора при напряжении 220/380 *в*

$$N_{п.нов} = N_{п.ст}\,\frac{U_{ф.нов}}{U_{ф.ст}} = 3{,}5\,\frac{220}{127} = 6{,}1.$$

Сечение эффективного провода обмотки статора при напряжении 127/220 *в*

$$F_{ст} = s_{1ст}\,ab = 5{,}432\cdot 2\cdot 3 = 32{,}5 \text{ мм}^2.$$

Необходимое сечение эффективного провода при напряжении 220/380 *в*.

$$F_{нов} = F_{ст}\,\frac{U_{ф.ст}}{U_{ф.нов}} = 32{,}5\,\frac{127}{220} = 18{,}8 \text{ мм}^2.$$

Сечение элементарного провода при четырех параллельных ветвях и выполнении обмотки в один провод:

$$s_{1нов} = \frac{F_{нов}}{ab} = \frac{18{,}8}{4\cdot 1} = 4{,}7 \text{ мм}^2.$$

По сечению находят диаметр провода: ∅ 2,44 *мм*, что соответствует сечению $s_1 = 4{,}676$ *мм*².

Ток при напряжении 220/380 *в*

$$I_{ф.нов} = I_{ф.ст} \frac{U_{ф.ст}}{U_{ф.нов}} = 133 \frac{127}{220} = 76{,}5 \ a.$$

Число элементарных проводов в пазу статора при напряжении 220/380 *в*

$$N_{нов} = N_{п.нов}\, ab = 6{,}1 \cdot 4 \cdot 1 = 24{,}4.$$

Принимается $N_{нов} = 25$; тогда $N_{п.нов} = \frac{25}{4 \cdot 1} = 6{,}25.$

В целях проверки подсчитывают:

величину максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре

$$B_в = \frac{C \cdot 10^6}{D_в L N_{п.нов}} = \frac{31{,}8 \cdot 10^6}{36{,}5 \cdot 21 \cdot 6{,}25} = 6\,650 \ гс;$$

плотность тока в обмотке статора

$$\Delta = \frac{I_{ф.нов}}{s_{1нов} ab} = \frac{76{,}5}{4{,}676 \cdot 4 \cdot 1} = 4{,}1 \ а/мм^2.$$

Величина максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре и плотность тока в обмотке статора не выходят за пределы допустимых величин (см. табл. 3 и 5).

Обмотку ротора при пересчете электродвигателя на новое напряжение не меняют, так как напряжение на кольцах ротора и фазный ток при этом остаются прежними.

Пример. Требуется пересчитать электродвигатель типа АО51-4 на 3 000 *об/мин*.

Технические данные:

мощность 4,5 *квт*; напряжение 220/380 *в*; ток 16,1/9,3 *а*, скорость вращения 1 500 *об/мин*; ротор — короткозамкнутый.

Данные замеров:

Внутренний диаметр статора	$D_в = 152$ *мм*
Диаметр ротора	$D_2 = 151{,}2$ *мм*
Длина активной стали статора (без вентиляционных каналов)	$L = 90$ *мм*
Число пазов статора	$z = 36$
Ширина зубца статора	$b_z = 7$ *мм*
Высота спинки статора	$h_c = 24{,}5$ *мм*
Число элементарных проводов в пазу	$N = 64$

Провод — ПЭЛБО ∅ 1,16 *мм*; параллельных ветвей нет; параллельных проводов — 2 (следовательно, $N_п = 32$).

Шаг по пазам 1—10; обмотка — однослойная.

Определяют наименьшее число полюсов, допустимое для данного электродвигателя:

$$2p = 0{,}5 \frac{D_в}{h_c} = 0{,}5 \frac{15{,}2}{2{,}45} = 3{,}1.$$

Ближайшее четное число 4 и, если пренебречь 0,1, также 2. Следовательно, конструкция электродвигателя позволяет изменить скорость вращения с 1 500 на 3 000 *об/мин.*

Определяют число эффективных проводов в пазу при переходе на новую скорость вращения:

$$N_{п.нов} = N_{п.ст} \frac{n_{ст}}{n_{нов}} = 32 \frac{1\,500}{3\,000} = 16.$$

Вычисляют величину максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре:

$$B_в = \frac{C \cdot 10^6}{D_в L N_{п.нов}} = \frac{15{,}9 \cdot 10^6}{15{,}2 \cdot 9 \cdot 16} = 7\,300 \text{ гс}.$$

Вычисляют магнитную индукцию в спинке статора:

$$B_a = 0{,}6 \frac{B_в D_в}{p h_с} = 0{,}6 \frac{7\,300 \cdot 15{,}2}{1 \cdot 24{,}5} = 27\,000 \text{ гс}.$$

Так как индукция в спинке статора слишком велика, следует число эффективных проводов в пазу увеличить.

Величина магнитной индукции в спинке статора принимается $B_a = 16\,500$ *гс* и окончательно определяется число эффективных проводов в пазу:

$$N_{п.нов} = 16 \frac{27\,000}{16\,500} = 26.$$

Пересчитывают соответственно и величину максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре:

$$B_в = 7\,300 \frac{16}{26} = 4\,500 \text{ гс}.$$

Определяют сечение элементарного провода при переходе с 32 эффективных проводов в пазу (при $n = 1\,500$ *об/мин*) на 26:

сечение элементарного провода при

$$n = 1\,500 \text{ об/мин } s_1 = 1{,}057 \text{ мм}^2.$$

Сечение эффективного провода

$$F_{ст} = s_1 ab = 1{,}057 \cdot 1 \cdot 2 = 2{,}114 \text{ мм}^2.$$

Новое сечение эффективного провода

$$F_{нов} = F_{ст} \frac{N_{п.ст}}{N_{п.нов}} = 2{,}114 \frac{32}{26} = 2{,}6 \text{ мм}^2.$$

Принимают число параллельных проводов $b = 2$; определяют сечение элементарного провода при $n = 3\,000$ *об/мин*:

$$s_{1нов}' = \frac{F_{нов}}{ab} = \frac{2{,}6}{1 \cdot 2} = 1{,}3 \text{ мм}^2.$$

Принимается провод ПЭЛБО ⌀ 1,30 *мм*; $s_{1нов}=1{,}327$ *мм*^{2}.
Число элементарных проводов в пазу

$$N_{нов}=N_{п.нов}ab=26\cdot 1\cdot 2=52.$$

Определяют плотность тока в обмотке статора при $n=1\,500$ *об/мин*:

$$\Delta_{ст}=\frac{I_{ф.ст}}{F_{ст}}=\frac{9{,}3}{2{,}114}=4{,}42 \ а/мм^2.$$

Определяют фазный ток при плотности тока $\Delta_{нов}=5{,}1$ *а/мм*^{2} с учетом улучшения охлаждения при переходе с 1 500 на 3 000 *об/мин*:

$$I_{ф.нов}=\Delta_{нов}s_{1нов}ab=5{,}1\cdot 1{,}327\cdot 1\cdot 2=13{,}5 \ а.$$

Определяют новую мощность электродвигателя, приняв к. п. д. и cos φ равными старым величинам:

$$P_{нов}=P_{ст}\frac{I_{ф.нов}}{I_{ф.ст}}=4{,}5\frac{13{,}5}{9{,}3}\approx 6{,}5 \ квт.$$

Вычисляют номинальный момент вращения на валу при старой и новой скоростях вращения:

$$M_{ст}=975\frac{P_{ст}}{n_{ст}}=975\frac{4{,}5}{1\,500}=2{,}92 \ кГ\cdot м;$$

$$M_{нов}=975\frac{P_{нов}}{n_{нов}}=975\frac{6{,}5}{3\,000}=2{,}11 \ кГ\cdot м.$$

Определяют, во сколько раз новый вращающий момент меньше старого:

$$\frac{M_{ст}}{M_{нов}}=\frac{2{,}92}{2{,}11}=1{,}38 \ \text{раза}.$$

Вычисляют окружную скорость ротора:

$$v_p=\frac{\pi D_2 n_{нов}}{60\cdot 1\,000}=\frac{3{,}14\cdot 151{,}2\cdot 3\,000}{60\cdot 1\,000}=23{,}8 \ м/сек,$$

что находится в пределах допустимого.

Обмотку выполняют двухслойной с шагом 1—13, двумя катушечными группами в фазе и при шести катушках в группе.

Пример. Пересчитать электродвигатель с фазным ротором с 1 500 на 750 *об/мин*. Технические данные электродвигателя типа *Т*: мощность 29 *квт*; напряжение 220/380 *в*; ток 97/56 *а*; скорость вращения $n=1\,500$ *об/мин*; напряжение на кольцах ротора $U_{лин2}=290$ *в*; соединение обмотки ротора ⅄.

Данные замеров:

Внутренний диаметр статора	$D_в=220$ *мм*
Диаметр ротора	$D_2=218{,}8$ *мм*
Длина активной стали статора (без вентиляционных каналов)	$L=245$ *мм*
Число пазов ротора	$z_2=48$
Число пазов статора	$z_1=36$
Число элементарных проводов в пазу	$N_1=34$

Провод ПБД $\varnothing$ 1,81 *мм* параллельно в два, две параллельные ветви. Обмотка статора — однослойная катушечная (концентрическая); шаг по пазам: 1—8; 1—10; 1—12. Обмотка ротора — катушечная (концентрическая); шаг по пазам: 1—10; 1—12; 1—14; 1—16. Число элементарных проводов в пазу $N_2=5$. Провод ПБД $\varnothing$ 3,53 *мм*; обмотка выполнена в один провод без параллельных ветвей; $s_{1,2}=9{,}787$ *мм*²; $N_{п2}=5$; соединение обмотки ротора $\curlywedge$.

Число эффективных проводов в пазу статора при $n=1\,500$ *об/мин*

$$N_{п1ст}=\frac{N_1}{ab}=\frac{34}{2\cdot 2}=8{,}5.$$

Число эффективных проводов в пазу статора при переходе на новую скорость вращения

$$N_{п1нов}=N_{п1ст}\frac{n_{ст}}{n_{нов}}=8{,}5\,\frac{1\,500}{750}=17.$$

Новое сечение провода обмотки статора:

сечение элементарного провода при $n=1\,500$ *об/мин* $s_1=2{,}573$ *мм*²;

сечение эффективного провода $F_{ст}=s_1ab=2{,}573\cdot 2\cdot 2=10{,}3$ *мм*².

Новое сечение эффективного провода

$$F_{нов}=F_{ст}\frac{N_{п1ст}}{N_{п1нов}}=10{,}3\,\frac{8{,}5}{17}=5{,}15\ мм^2.$$

Принимается число параллельных проводов $b_{нов}=2$, а число параллельных ветвей $a_{нов}=2$; тогда число элементарных проводов в пазу статора

$$N_п=N_{п1нов}ab=17\cdot 2\cdot 2=68.$$

Сечение элементарного провода

$$s_{1нов}=\frac{F_{нов}}{a_{нов}b_{нов}}=\frac{5{,}15}{2\cdot 2}=1{,}29\ мм^2.$$

Принимается провод ПЭЛБО $\varnothing$ 1,25 *мм*; $s_{1нов}=1{,}23$ *мм*².

Пересчитывают величину сечения эффективного провода:

$$F_{нов}=s_{1нов}ab=1{,}23\cdot 2\cdot 2=4{,}92\ мм^2.$$

Мощность электродвигателя при $n=750$ *об/мин* без учета изменения к. п. д. и $\cos\varphi$

$$P'_{нов}=P_{ст}\frac{n_{нов}}{n_{ст}}=29\,\frac{750}{1\,500}=14{,}5\ квт.$$

Учитывая ухудшение охлаждения при переходе на меньшую скорость вращения, мощность электродвигателя следует уменьшить на 10%:

$$P''_{нов}=0{,}9\,P'_{нов}=0{,}9\cdot 14{,}5=13\ квт.$$

По приложению 7 находят к. п. д. и $\cos\varphi$ для $P=29$ *квт* и $n=1\,500$ *об/мин*: $\eta=0{,}87$ и $\cos\varphi=0{,}87$, а для $P=13$ *квт* и $n=750$ *об/мин* $\eta=0{,}83$ и $\cos\varphi=0{,}77$.

Определяют мощность электродвигателя:

$$P_{нов} = 0{,}9P_{ст}\frac{n_{нов}\eta_{нов}\cos\varphi_{нов}}{n_{ст}\eta_{ст}\cos\varphi_{ст}} = 0{,}9\cdot 29 \times$$

$$\times\frac{750\cdot 0{,}83\cdot 0{,}77}{1\,500\cdot 0{,}87\cdot 0{,}87} \approx 11\ квт.$$

Проверяют:

плотность тока в обмотке статора

$$I_{ф1нов} = \frac{P_{нов}\cdot 10^3}{3U_ф\eta_{нов}\cos\varphi_{нов}} = \frac{11\cdot 10^3}{3\cdot 220\cdot 0{,}83\cdot 0{,}77} = 25{,}9\ a;$$

$$\Delta_{нов} = \frac{I_{ф1нов}}{F_{нов}} = \frac{25{,}9}{4{,}92} = 5{,}3\ a/мм^2;$$

максимальная индукция в воздушном зазоре при $n = 750$ *об/мин*

$$B_в = \frac{C\cdot 10^6}{D_в L N_{п.нов}} = \frac{63{,}6\cdot 10^6}{22\cdot 24{,}5\cdot 17} = 7\,000\ гс.$$

Магнитную индукцию в зубце статора не подсчитывают, так как при переходе с 1 500 на 750 *об/мин* она не изменится, ибо максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре не изменилась (уменьшили скорость вращения в 2 раза и увеличили число эффективных проводов в пазу тоже в 2 раза).

Обмотка статора двухслойная с шагом по пазам 1—5. В фазе четыре катушечные группы по одной катушке и четыре по две катушки в группе.

Определяют число эффективных витков в фазе обмотки ротора при n=750 *об/мин*. Напряжение на кольцах ротора оставляют прежним, т. е.

$$U_{лин2} = 290\ в;$$

$$w_{2нов} = \frac{w_{1нов}U_{ф2}}{U_{ф1}}\ витков.$$

Предварительно вычислим число эффективных витков в фазе обмотки статора:

$$w_{1нов} = \frac{N_{п1нов}z_1}{2m_1} = \frac{N_{п1нов}z_1}{6} = \frac{17\cdot 36}{6} = 102\ витка.$$

Число эффективных витков в фазе обмотки ротора

$$w_{2нов} = \frac{102\cdot 290}{220\sqrt{3}} = 78\ витков$$

$\left(U_{ф2} = \frac{U_{лин2}}{\sqrt{3}}\right.$, так как обмотка соединена в $\curlywedge$).

Число эффективных проводов в пазу ротора

$$N_{п2\,нов} = \frac{2m_2 w_{2\,нов}}{z_2} = \frac{6w_{2\,нов}}{z_2} = \frac{6 \cdot 78}{48} = 9{,}75.$$

Принимая $N_{п2\,нов} = 10$, пересчитывают:
число эффективных витков в фазе обмотки ротора

$$w_{2\,нов} = 78\,\frac{10}{9{,}75} = 80;$$

линейное напряжение на кольцах ротора

$$U_{лин2} = 290\,\frac{80}{78} = 297\ \textit{в}.$$

Определяют ток ротора:

$$I_{ф2нов} = (0{,}9 - 0{,}85)\, I_{ф\,1нов}\,\frac{w_{1нов}}{w_{2нов}} = 0{,}9 \cdot 25{,}9\,\frac{102}{80} = 29{,}2\ \textit{а}.$$

Определяют сечение эффективного провода обмотки ротора при $N_{п2нов} = 10$:

$$F_{2\,нов} = F_{2ст}\,\frac{N_{п2ст}}{N_{п2нов}} = s_{1ст} a_{ст} b_{ст}\,\frac{N_{п2ст}}{N_{п2нов}} = 9{,}787 \cdot 1 \cdot 1\,\frac{5}{10} = 4{,}89\ \textit{мм}^2.$$

Принимается провод ПБД $\varnothing$ 1,74 *мм* (сечение $s_{1,2нов} = 2{,}378$ *мм*^{2}); обмотку выполняют с двумя параллельными ветвями в один провод ($N_{2нов} = 2N_{п\,2нов}$). Проверяют заполнение паза ротора вычислением коэффициента заполнения паза и сравнением его с общепринятыми величинами или практическим заполнением паза проводом $\varnothing$ 1,74 *мм*.

Определяют плотность тока в обмотке ротора:

$$\Delta_{2\,нов} = \frac{I_{ф2нов}}{s_{1,2нов} a_{нов} b_{нов}} = \frac{29{,}2}{2{,}378 \cdot 1 \cdot 2} = 6{,}1\ \textit{а/мм}^2,$$

что находится в пределах допустимого.

Обмотку ротора выполняют катушечной с шагом по пазам 1—6 и 1—8 с четырьмя катушечными группами в фазе, а в катушечной группе по две катушки.

Вычисляют номинальный момент вращения на валу электродвигателя при старой и новой скоростях вращения:

$$M_{ст} = 975\,\frac{P_{ст}}{n_{ст}} = 975\,\frac{29}{1\,500} = 18{,}8\ \textit{кГ}\cdot\textit{м};$$

$$M_{нов} = 975\,\frac{P_{нов}}{n_{нов}} = 975\,\frac{12}{750} = 15{,}6\ \textit{кГ}\cdot\textit{м}.$$

Вычисляют, во сколько раз уменьшился номинальный вращающий момент при переходе на новую скорость вращения:

$$\frac{M_{ст}}{M_{нов}} = \frac{18{,}8}{15{,}6} = 1{,}21\ \text{раза}.$$

Пример. Требуется пересчитать на частоту 150 *гц* электродвигатель А 31/4 0,6 *квт*, 220/380 *в*, 2,8/1,6 *а*, 50 *гц*, 1 410 *об/мин*.

Данные обмотки: $z=24$; $2p=4$; число эффективных проводов в пазу $N_п=118$; провод ПЭЛБО ∅ 0,57 *мм* без параллельных ветвей и параллельных проводов.

Число эффективных проводов в пазу

$$N_{п.нов} = N_{п.ст}\frac{f_{ст}}{f_{нов}} = 118\frac{50}{150} \approx 40.$$

Сечение эффективного провода

$$F_{нов} = F_{ст}\frac{f_{нов}}{f_{ст}} = 0{,}255\frac{150}{50} = 0{,}765\ мм^2.$$

Берем провод ПЭЛБО сечением 0,724 *мм*², что соответствует ∅ 0,96 *мм*.

Мощность электродвигателя

$$P_{нов} = P_{ст}\frac{f_{нов}}{f_{ст}} = 0{,}6\frac{150}{50} = 1{,}8\ квт.$$

Ток при неизменных к. п. д. и $\cos\varphi$

$$I_{нов} = I_{ст}\frac{f_{нов}}{f_{ст}} = 1{,}6\frac{150}{50} = 4{,}8\ a$$

Вычислим плотность тока (для проверки правильности расчета):

$$\Delta = \frac{I_{нов}}{F_{нов}} = \frac{4{,}8}{0{,}765} = 6{,}27\ а/мм^2.$$

Новая скорость вращения (синхронная)

$$n_{нов} = n_{ст}\frac{f_{нов}}{f_{ст}} = 1\,500\frac{150}{50} = 4\,500\ об/ман.$$

26. ЗАМЕЧАНИЯ К РАСЧЕТАМ

После произведенного частичного ремонта или полной замены обмотки статора технические данные электродвигателя должны соответствовать данным обмоточно-расчетной карточки и, кроме того, отношение пускового и максимального моментов вращения к номинальному должно соответствовать ГОСТ. Поскольку измерение моментов вращения электродвигателей сопряжено с некоторыми трудностями, чаще всего о пригодности электродвигателя судят по величине тока холостого хода, который должен составлять определенный процент номинального тока для данной группы электродвигателей. В табл. 12 (см. гл. 11) указаны допустимые величины тока холостого хода в процентах номинального

в зависимости от мощности и скорости вращения электродвигателя.

Иногда бывает, что хотя обмотка статора выполнена по правильно произведенному расчету, но при испытании ток холостого хода завышен. Такое явление может быть объяснено следующим.

Сердечник статора или ротора сдвинут с места, что уменьшает фактическую длину активной стали.

Активная сталь статора (ротора) или того и другого низкого качества. Для устранения этого дефекта обмотку статора следует перемотать с увеличением числа эффективных проводов в пазу при соответствующем снижении мощности.

Зазор между сердечником статора и сердечником ротора завышен из-за чрезмерной проточки ротора или длительного трения стали ротора о сталь статора. В таких случаях обмотку статора следует перемотать, увеличив число эффективных проводов в пазу, снизив при этом мощность. Бывают случаи, когда воздушный зазор так велик, что может возникнуть вопрос о целесообразности перемотки статора из-за резкого снижения $\cos \varphi$ и чрезмерного нагрева. В таких случаях, если его все же ремонтируют, при пересчете мощность электродвигателя должна быть соответственно снижена.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

СООБРАЖЕНИЯ ПО РАСЧЕТАМ ОБМОТОК И ВЫБОРУ ФАЗОСМЕЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ АСИНХРОННЫХ ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. ПЕРЕСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА С ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ НА ОДНОФАЗНУЮ

27. О МЕТОДИКЕ И ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПАХ РАСЧЕТА ОБМОТОК СТАТОРА ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ФАЗОСМЕЩАЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

При проектировании однофазных электродвигателей с фазосмещающими элементами расчет обмоток (рабочей, пусковой, конденсаторной) и фазосмещающего элемента (пусковой емкости, рабочей емкости, активного

сопротивления) выполняют применительно к заданным условиям пуска и работы двигателя.

В числе требуемых условий могут быть:

а) получение максимального пускового момента;

б) получение заданной кратности пускового момента;

в) получение заданной кратности пускового тока;

г) оптимальный режим работы при номинальной нагрузке;

д) оптимальный режим работы при заданной нагрузке;

е) получение заданной кратности максимального вращающего момента.

Часто поставленные требования являются противоречивыми и при расчете однофазных электродвигателей удовлетворяются неполностью.

Сам расчет[1] является трудоемким и сложным, что объясняется наличием двух обмоток, числа витков и параметры которых, включая параметры фазосмещающих элементов, должны быть в строго определенном соотношении и взаимно увязаны, чем и достигается осуществление заданных условий работы и пуска двигателя.

Поэтому при ремонте асинхронных однофазных электродвигателей рекомендуется выполнять обмотки по старым данным, сверив их с данными таблиц обмоточных данных для соответствующих электродвигателей.

Если изменились требуемые условия пуска или работы электродвигателя и требуется в ходе ремонта изменить обмоточные данные или данные фазосмещающего элемента, то при выборе новых обмоточных данных или фазосмещающего элемента следует иметь в виду следующие положения:

1. В двигателях с емкостью или активным сопротивлением в цепи пусковой обмотки вращающий момент, скольжение, максимальный вращающий момент, к. п. д. и коэффициент мощности зависят только от данных рабочей обмотки, а пусковой момент и кратность пускового тока — от параметров обеих обмоток.

В конденсаторных двигателях как эксплуатационные, так и пусковые характеристики зависят от обеих обмоток.

---

[1] Метод расчета при проектировании однофазных асинхронных электродвигателей изложен в книге Е. М. Лопухиной и Г. С. Сомихиной «Расчет асинхронных микродвигателей однофазного и трехфазного тока» (Госэнергоиздат, 1961).

2. Пусковой момент в двигателях с пусковой емкостью можно увеличить одним из следующих способов:

а) увеличивая емкость конденсатора;

б) увеличивая сопротивление ротора путем проточки короткозамыкающих колец (или — в условиях электромашиностроительных заводов — перезаливкой беличьей клетки алюминиевым сплавом с повышенным сопротивлением);

в) увеличивая число витков пусковой обмотки.

Пусковой ток в двигателях с пусковой емкостью можно уменьшить:

а) увеличивая сопротивление ротора;

б) увеличивая число витков пусковой обмотки, уменьшив при этом емкость конденсатора.

Однако следует помнить, что с увеличением сопротивления ротора у электродвигателя с пусковой емкостью перегрузочная способность последнего (т. е. отношение максимального момента вращения к номинальному) уменьшается, а скольжение, соответствующее максимальному моменту, увеличивается.

В конденсаторных электродвигателях максимальный момент вращения почти не зависит от величины активного сопротивления ротора.

3. В электродвигателях с вынесенным или встроенным пусковым сопротивлением отношение числа эффективных витков[1] пусковой обмотки к числу эффективных витков рабочей обмотки (так называемый коэффициент трансформации) принимается обычно меньшим единицы. Например, в двигателях единой серии со встроенным пусковым сопротивлением типа АОЛБ коэффициент трансформации находится в пределах 0,23—0,83, увеличиваясь по мере увеличения мощности электродвигателя. Однако при значительном уменьшении коэффициента трансформации пусковой ток может выйти за пределы допустимой величины.

В электродвигателях типа АОЛГ (с пусковой емкостью) коэффициент трансформации находится в пределах 0,8—1,45.

[1] В литературе по расчетам микродвигателей числом эффективных витков принято называть произведение числа витков в фазе обмотки статора на обмоточный коэффициент (эффективное число витков равно $w_1 \times k_w$).

В конденсаторных электродвигателях коэффициент трансформации может значительно отклоняться от единицы в ту или другую сторону. При коэффициенте трансформации, равном единице, сечение провода рабочей и конденсаторной обмоток одинаково, а при отклонении от единицы сечения провода рабочей и конденсаторной обмоток должны быть обратно пропорциональны числам витков их, чем достигается примерно одинаковая плотность тока в обеих обмотках.

4. У электродвигателей с фазосмещающими элементами в цепи пусковой обмотки (емкость, активное сопротивление) сечение провода пусковой обмотки выбирается обычно меньшим, чем сечение провода рабочей обмотки, так как плотность тока в пусковой обмотке можно допустить большей (в 3—4 раза).

У этих же электродвигателей ток холостого хода может составлять 80—95% номинального. Если ток холостого хода приближается к величине номинального тока или превышает ее, то следует уменьшить индукцию в воздушном зазоре $B_в$, увеличив соответственно число витков рабочей обмотки и уменьшив при необходимости сечение эффективного провода.

5. При расчетах однофазных электродвигателей большое значение имеет правильный выбор электромагнитных нагрузок: максимальной индукции в воздушном зазоре $B_в$, плотности тока Δ и линейной нагрузки A *.

Для однофазного электродвигателя с пусковым элементом линейная нагрузка определяется как отношение ампер-проводов рабочей обмотки к длине той части окружности, на которой расположены пазы, занимаемые этой обмоткой:

$$A = \frac{2w_A I_A}{a_{zA}}, \qquad (42)$$

где a_{zA} — длина дуги окружности, занимаемой пазами рабочей обмотки.

---

* Линейной нагрузкой называется число ампер-проводов, приходящихся на 1 *см* длины внутренней окружности (расточки) статора:

$$A = \frac{2\,wI_н}{\pi D_в},\ а/см.$$

В современных однофазных электродвигателях линейная нагрузка обычно составляет:

при $2p=2$ $A=105\div125$ (реже — до 150) *а/см*;

при $2p=4$ $A=120\div165$ (реже — до 200) *а/см*.

Плотность тока рабочей обмотки берется в пределах 4—8 *а/мм*². Нижний предел берется для более мощных и более тихоходных электродвигателей с худшими условиями охлаждения.

Магнитная индукция может находиться в пределах 3 000—8 000 *гс*. Нижний предел относится к электродвигателям меньшей мощности и при требовании малошумности электродвигателя.

Для однофазных электродвигателей единой серии индукции приняты следующие:

при $2p=2$ $B_в$ $4\,500\div5\,500$ *гс*;

при $2p=4$ $B_в$ $6\,000\div7\,500$ *гс*;

меньшие значения магнитной индукции относятся к электродвигателям меньшей мощности.

6. Правильность принятого значения магнитной индукции в воздушном зазоре проверяется вычислением магнитной индукции в зубце B_z и спинке статора B_a.

$$B_z = B_в \frac{t_1}{b_z k_c}, \tag{43}$$

где t_1 — зубцовое деление статора:

$$t_1 = \frac{\pi D_в}{z}; \tag{44}$$

b_z — расчетная ширина зубца;

k_c — коэффициент заполнения пакета статора сталью.

При толщине стали 0,5 *мм* и оксидировании листов $k_c=0{,}95$, при лакировке листов $k_c=0{,}93$.

Индукция в спинке статора определяется по формуле

$$B_a = \frac{\Phi}{2h_c L k_c}, \tag{45}$$

где h_c — высота спинки статора;

Ф — магнитный поток (см. п. 47).

В современных однофазных электродвигателях принимается:

$$B_z = 14\,000 \div 20\,000 \ гс;$$

$$B_a = 12\,000 \div 19\,000 \ гс;$$

индукция B_a принимается тем большей, чем меньше число полюсов.

В двигателях небольшой мощности индукции B_z и B_a принимаются ближе к меньшему пределу. Для малошумных однофазных электродвигателей принимается: B_z не более 13 000 *гс*, а B_a не более 10 000 *гс*.

7. Число витков в фазе рабочей обмотки статора однофазного электродвигателя определяется по общей для микродвигателей формуле

$$w_1 = \frac{U_н k_e \cdot 10^8}{4{,}44 f \Phi k_w}, \qquad (46)$$

где k_e — коэффициент, учитывающий падение напряжения в обмотке статора:

$$k_e = \frac{E_н}{U_н} = 0{,}7 \div 0{,}9.$$

Меньшая величина k_e берется для электродвигателей меньшей мощности.

Формулы, которыми пользуются для вычисления обмоточных коэффициентов k_w, из-за их сложности не приводятся [1].

Ниже приводятся обмоточные коэффициенты для некоторых видов однослойных и двухслойных обмоток однофазных электродвигателей с пусковыми элементами.

Магнитный поток определяется по формуле

$$\Phi = \alpha \tau L B_в, \ мкс, \qquad (47)$$

где α — коэффициент магнитного перекрытия;

L — длина активной стали статора без вентиляционных каналов.

---

[1] Метод определения величины обмоточных коэффициентов различных видов обмоток подробно изложен в книге Е. М. Лопухиной и Г. С. Сомихиной «Расчет асинхронных микродвигателей однофазного и трехфазного тока» (Госэнергоиздат, 1961).

Таблица 7

Вид обмотки	Число полюсов $2p$	Число пазов рабочей обмотки z_A	Число пазов пусковой обмотки z_B	Число пазов статора	Шаг обмотки y	Число пазов на полюс	Обмоточный коэффициент k_w
Однослойная рабочая	2	12		18	Диаметр	6	0,830
» пусковая			6		»	3	0,956
» рабочая	2	16		24	»	8	0,826
» пусковая			8		»	4	0,953
» рабочая	4	16		24	»	4	0,834
» пусковая			8		»	2	0,965
» рабочая	4	24		36	»	6	0,830
» пусковая			12		»	3	0,956
Двухслойная рабочая	2	12		18	6	6	0,719
» пусковая			6		6	3	0,830
» рабочая	2	16		24	8	8	0,716
» пусковая			8		8	4	0,829
» рабочая	4	16		24	4	4	0,726
» пусковая			8		4	2	0,837
» рабочая	4	24		36	6	6	0,719
» пусковая			12		6	3	0,830

Принимают $\alpha \approx 0{,}66 \div 0{,}73$.

Число эффективных витков в пазу у однофазных двигателей, если рабочая обмотка занимает $^2/_3$ пазов, определяют по формуле

$$N_п = \frac{3w_1}{z}. \qquad (48)$$

Сечение эффективного провода определяют по формуле

$$F = \frac{I_н}{\Delta},\ мм^2.$$

8. С достаточной для практики точностью емкость рабочего конденсатора для однофазного электродвигателя современной конструкции можно выбрать, пользуясь формулой[1]

$$C \approx (2\,100 \div 2\,300)\frac{P_н}{U^2},\ мкф,$$

[1] П. С. Сергеев, Электрические машины, Госэнергоиздат, 1962.

где $P_н$ — номинальная мощность электродвигателя, *вт*;
U — напряжение электродвигателя, *в*.

Вычисленная по приведенной выше формуле емкость рабочего конденсатора будет обеспечивать оптимальный режим работы электродвигателя при нагрузке, близкой к номинальной. Пусковой момент при этом будет составлять $(0{,}2 \div 0{,}4)\,M_н$.

Напряжение конденсатора должно быть равно $(1{,}3 \div 1{,}6)\,U$,
где U — напряжение электродвигателя. При работе электродвигателя с недогрузкой напряжение конденсатора берется ближе к высшему пределу.

Если требуется обеспечить заданную кратность пускового момента в конденсаторном электродвигателе или электродвигателе с пусковой емкостью, то часто приемлемая величина емкости рабочего или пускового конденсатора подбирается опытным путем.

Опытным путем можно подобрать также необходимое активное сопротивление для пуска однофазного электродвигателя с пусковой обмоткой при заданной кратности пускового момента. Во время опыта следует использовать ползунковый реостат соответствующего сопротивления.

9. При включении трехфазных электродвигателей по схеме однофазных рабочую емкость для режима номинальной нагрузки можно подобрать, пользуясь следующими выведенными из практики соотношениями[1]:

при включении электродвигателя по схеме *ж*, рис. 29

$$C_р \approx 2\,800 \frac{I_н}{U},\ мкф;$$

при включении электродвигателя по схеме *з* (рис. 29)

$$C_р \approx 4\,800 \frac{I_н}{U},\ мкф;$$

при включении электродвигателя по схеме *е* (рис. 29)

$$C_р \approx 2\,740 \frac{I_н}{U},\ мкф,$$

[1] Н. Д. Торопцев, Применение трехфазного асинхронного двигателя в схеме однофазного включения с конденсатором, Госэнергоиздат, 1963.

где $C_р$ — емкость рабочего конденсатора, соответствующая оптимальным рабочим характеристикам при номинальной нагрузке;

$I_н$ и U — номинальный ток и номинальное напряжение.

Номинальным током и номинальным напряжением в данном случае называют фазные значения этих величин, указанные в паспорте. Например, при U=220/380 *в* и I=3,8/2,2 *а*, если двигатель включен по схеме *ж* или *е* (рис. 29), фазные значения будут 220 *в* и 2,2 *а*.

Если подобранная рабочая емкость не обеспечивает требуемого пускового момента, то дополнительно подбирают пусковую емкость опытным путем.

10. Если однофазный электродвигатель, пересчитанный из трехфазного, не достигает нормальной скорости вращения, а застревает на низшей скорости, что может быть при однослойной обмотке статора и отсутствии скоса пазов ротора, то следует увеличить сопротивление клетки ротора проточкой короткозамыкающих колец, а также увеличить воздушный зазор (шлифовкой ротора) на 15—20%.

28. ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА ОДНОФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ СО ВСТРОЕННЫМ ПУСКОВЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Последовательность поверочного расчета рассмотрим на примере.

Требуется определить электромагнитные нагрузки и коэффициент трансформации электродвигателя АОЛБ 32/4.

Данные электродвигателя и обмотки:

Мощность на валу	$P = 0{,}4$ *квт*
Напряжение	$U = 220$ *в*
Ток	$I = 4{,}4$ *а*
Скорость вращения	$n = 1\,440$ *об/мин*
Внутренний диаметр статора . .	$D_в = 89$ *мм*
Длина пакета статора	$L = 85$ *мм*
Ширина зубца (расчетная) пакета статора	$b_z = 6$ *мм*
Высота спинки пакета статора	$h_c = 12{,}7$ *мм*
Число пазов статора	$z = 24$
Число пазов, занимаемое рабочей обмоткой	$z_A = 16$
Число пазов, занимаемое пусковой обмоткой	$z_B = 8$

Рабочая обмотка:

Число эффективных проводов в обмотке	$N_{п.фA} = 864$
Число эффективных проводов в пазу	$N_{пA} = 54$
Марка и диаметр провода . . .	ПЭВ-2 ∅ 0,9 *мм* ⇒ S = 0,636 = F

Пусковая обмотка:

Число эффективных проводов в пазу	$N_{пB} = 52$
Число проводов в пазу, включая бифилярную катушку	$N_B = 108$
Марка и диаметр провода . . .	ПЭЛШКО ∅ 0,59 *мм*

а) Вычислим линейную нагрузку:

$$A = \frac{2w_A I_A}{\alpha_{zA}} = \frac{N_{п.фA} I_A}{\frac{\pi D_в}{z} z_A} = \frac{864 \cdot 4,4}{\frac{\pi \cdot 8,9}{24} \cdot 16} = \frac{864 \cdot 4,4}{18,6} = 204 \text{ ампер-проводов.}$$

б) Плотность тока рабочей обмотки

$$\Delta = \frac{I_н}{F} = \frac{4,4}{0,636} = 6,9 \ а/мм^2.$$

в) Магнитный поток

$$\Phi = \frac{U_н k_e \cdot 10^8}{4,44 f w_A k_w} = \frac{220 \cdot 0,8 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot \frac{864}{2} \cdot 0,835} = 0,219 \cdot 10^6 \ мкс.$$

г) Магнитная индукция в воздушном зазоре

$$B_в = \frac{\Phi}{\alpha \tau L} = \frac{0,219 \cdot 10^6}{0,7 \frac{\pi D_в}{4} \cdot 8,5} = \frac{4 \cdot 0,219 \cdot 10^6}{0,7\pi \cdot 8,9 \cdot 8,5} = 5\,250 \ гс.$$

д) Магнитная индукция в зубце

$$B_z = B_в \frac{t_1}{b_z k_c} = B_в \frac{\frac{\pi D_в}{z}}{b_z k_c} = 5\,250 \frac{\frac{\pi \cdot 8,9}{24}}{0,6 \cdot 0,93} = 10\,900 \ гс.$$

е) Магнитная индукция в спинке

$$B_a = \frac{\Phi}{2h_c L k_c} = \frac{0,219 \cdot 10^6}{2 \cdot 1,27 \cdot 8,5 \cdot 0,93} = 10\,850 \ гс.$$

ж) Коэффициент трансформации

$$k=\frac{w_{эB}}{w_{эA}}=\frac{k_{wB}w_B}{k_{wA}w_A}=\frac{0,965\frac{N_{пB}}{2}}{0,834\frac{N_{пA}}{2}}=\frac{0,965\cdot\frac{416}{2}}{0,834\cdot\frac{864}{2}}=0,556.$$

Следовательно, плотность тока и магнитные нагрузки находится в пределах допустимых величин; по магнитным нагрузкам двигатель немного недогружен.

29. ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА ОДНОФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С РАСЩЕПЛЕННЫМИ ПОЛЮСАМИ

Методика расчета однофазных электродвигателей с расщепленными полюсами является пока еще приближенной [1]. Однако для поверочных расчетов она является вполне приемлемой.

Данными для поверочного расчета являются:

а) Геометрические размеры сердечника статора и полюса:

Диаметр расточки	$D_в$ *см*
Длина пакета статора	L *см*
Осевая длина полюса	$L_{пл}=L$ *см*
Ширина сердечника полюса	$b_{пл}$ *см*
Ширина сердечника (спинки)	$h_с$ *см*

б) Данные обмотки:

Число витков обмотки, приходящееся на полюс	$w_{пл}$
Число полюсов	$2p$
Число параллельных ветвей	a
Число параллельных проводов	b
Марка и диаметр обмоточного провода . .	

в) Технические данные электродвигателя:

Полезная мощность на валу	P *вт*
Напряжение питающей сети	U *в*
Ток	I *а*
Частота сети	f *гц*
Синхронная скорость вращения	n *об/мин*

Число витков обмотки на один полюс вычисляется по формуле

$$w_{пл}=\frac{E_1\cdot 10^8}{2p\cdot 4,44 f_1\Phi}, \qquad (49)$$

где $E_1=k_E U_1=(0,8\div 0,94)U_1$;

Ф — магнитный поток:

$$\Phi=B_в b_0 L, \qquad (50)$$

---

[1] Н. П. Ермолин, Электрические машины малой мощности, изд-во «Высшая школа», 1962.

где b_0 — расчетная полюсная дуга;
$b_0 = \alpha\tau = (0{,}60 \div 0{,}90)\tau$, *см*;

$$\tau = \frac{\pi D_в}{2p}, \text{ см.}$$

Максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре $B_в$ принимается в пределах 4 000—6 000 *гс*. Нижний предел относится к менее мощным электродвигателям и с меньшим числом полюсов ($2p = 2$), а верхний — к более мощным электродвигателям и с большим числом полюсов ($2p = 4$ и более).

Сечение эффективного провода

$$F = \frac{I_1}{\Delta_1}, \text{ мм}^2,$$

где $\Delta_1 \approx 3 \div 5$ *а/мм²*.

В однофазных электродвигателях ток I_1 определяется при известной полезной мощности по формуле

$$I_1 = \frac{P}{U_1 \eta \cos\varphi}, \text{ а.} \quad (51)$$

Индукция в сердечнике полюса определяется по формуле

$$B_{пл} = \frac{\Phi\sigma}{S_{пл}} = \frac{\Phi\sigma}{L_{пл} b_{пл} k_с}, \text{ гс.} \quad (52)$$

где σ — коэффициент магнитного рассеяния обмотки статора;
$\sigma = 1{,}10 \div 1{,}16$;
$k_с$ — коэффициент заполнения сердечника полюса сталью;
$k_с = 0{,}93 \div 0{,}95$.

Величина индукции в сердечнике полюса $B_{пл}$ принимается в пределах 8 000—10 000 *гс*.

Индукция в сердечнике (спинке) статора определяется по формуле

$$B_a = \frac{\Phi\sigma}{2h_с L k_с}. \quad (53)$$

Величина индукции в спинке статора B_a принимается в пределах 8 000—10 000 *гс*.

Пример. Проверить соответствие числа витков и сечения провода в электродвигателе для кокономотальных автоматов, а также пересчитать электродвигатель на напряжение 220 *в*.

Технические данные электродвигателя:

Полезная мощность	$P = 5$ *вт*
Напряжение	$U = 36$ *в*
Ток	$I = 0{,}9$ *а*
Частота	$f = 50$ *гц*
Синхронная скорость вращения	$n = 1\,500$ *об/мин*

Геометрические размеры статора:

Диаметр расточки . . . . $D_в = 43$ *мм*
Длина пакета статора . . . . $L = 34$ *мм*
Осевая длина полюса . . . . $L_{пл} = L = 34$ *мм*
Ширина сердечника полюса . . . . $b_{пл} = 24$ *мм*
Ширина спинки статора . . . . $h_с = 5$ *мм*

Данные обмотки:

Число витков обмотки, приходящееся на полюс . . . . $w'_{пл} = 300$
Число полюсов . . . . $2p = 4$
Число параллельных ветвей . . . . $a = 2$
Число эффективных витков обмотки, приходящееся на полюс . . . . $w_{пл} = \frac{w'_{пл}}{a} = \frac{300}{2} = 150$

Провод ПЭВ-2 ∅ 0,35 *мм*, сечение 0,0962 *мм*²

Определяем магнитный поток:

$$\Phi = \frac{E_1 \cdot 10^8}{2p \cdot 4{,}44 f w_{пл}} = \frac{0{,}85 \cdot 36 \cdot 10^8}{4 \cdot 4{,}44 \cdot 50 \cdot 150} = 2{,}29 \cdot 10^4 \text{ мкс.}$$

Магнитная индукция в воздушном зазоре

$$B_в = \frac{\Phi}{b_0 L} = \frac{\Phi}{\alpha \tau L} = \frac{2{,}29 \cdot 10^4}{0{,}75 \frac{\pi \cdot 4{,}3 \cdot 3{,}4}{4}} = 2\,670 \text{ гс.}$$

Индукция в сердечнике полюса

$$B_{пл} = \frac{\Phi\sigma}{L_{пл} b_{пл} k_с} = \frac{2{,}29 \cdot 10^4 \cdot 1{,}12}{3{,}4 \cdot 2{,}4 \cdot 0{,}93} = 3\,350 \text{ гс.}$$

Индукция в спинке статора

$$B_с = \frac{\Phi\sigma}{2 h_с L k_с} = \frac{2{,}29 \cdot 10^4 \cdot 1{,}12}{2 \cdot 0{,}5 \cdot 3{,}4 \cdot 0{,}93} = 8\,100 \text{ гс.}$$

Плотность тока

$$\Delta = \frac{I}{s_1 a} = \frac{0{,}9}{0{,}0962 \cdot 2} = 4{,}65 \text{ а/мм}^2.$$

Из поверочного расчета видно, что сердечник полюса недогружен, а сердечник статора (спинка) имеет предельную магнитную нагрузку для данной мощности электродвигателя. Плотность тока приближается к верхнему пределу.

Пересчитаем обмотку на напряжение 220 *в* и выполним ее без параллельных ветвей.

Число витков на полюс при напряжении 220 *в*

$$w_{пл.нов} = w_{пл.ст} \frac{U_{нов}}{U_{ст}} = 150 \frac{220}{36} = 917.$$

Принимаем $w_{пл.нов} = 920$.

Сечение эффективного провода

$$F'_{нов} = F_{ст} \frac{U_{ст}}{U_{нов}} = s_1 a \frac{U_{ст}}{U_{нов}} = 0{,}0962 \cdot 2 \frac{36}{220} = 0{,}0314 \text{ мм}^2.$$

Сечению 0,0314 $мм^2$ соответствует диаметр 0,20 *мм*, однако, учитывая уменьшение коэффициента заполнения паза медью при переходе на меньшие сечения провода, берем ∅ 0,18 *мм*; тогда сечение

$$F_{нов} = 0{,}0254 \text{ мм}^2.$$

Пересчитаем плотность тока:

$$\Delta_{нов} = \Delta_{ст} \frac{F'_{нов}}{F_{нов}} = 4{,}65 \frac{0{,}0314}{0{,}0254} = 5{,}73 \text{ а/мм}^2,$$

что можно допустить.

Ток при $U_{нов} = 220$ *в*

$$I = s_{1нов} \Delta_{нов} = 0{,}0254 \cdot 5{,}73 = 0{,}141 \text{ а}.$$

Произведение к. п. д. на cos φ в процентах

$$\eta \cos \varphi = \frac{P}{UI} = \frac{5 \cdot 100}{220 \cdot 0{,}141} = 16\%.$$

30. ПЕРЕСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ НА ОДНОФАЗНУЮ

Пересчет обмотки с трехфазной системы на однофазную облегчается тем, что при неизменной скорости вращения отпадает необходимость в подсчете магнитных нагрузок — индукции в воздушном зазоре, зубце и спинке статора.

Для небольших электродвигателей магнитные нагрузки оставляют прежними, а для средних увеличивают их на 10—15%, соответственно уменьшая полученное методом пересчета число эффективных витков и увеличивая сечение эффективного провода.

Если заданное напряжение однофазного электродвигателя соответствует фазному напряжению трехфазного электродвигателя, то число эффективных витков рабочей обмотки однофазного электродвигателя принимается равным числу витков фазы трехфазного электродвигателя ($w_{IA} = w_{III}$).

Если напряжение однофазного электродвигателя отличается от фазного напряжения трехфазного элек-

тродвигателя, то пересчет числа витков производится по формуле

$$w_{IA} = w_{III} \frac{U_I}{U_{III\phi}}, \qquad (54)$$

где w_{IA} — число эффективных витков рабочей обмотки однофазного электродвигателя;
w_{III} — число эффективных витков фазы обмотки трехфазного электродвигателя;
U_I — напряжение однофазного электродвигателя;
$U_{III\phi}$ — фазное напряжение трехфазного электродвигателя.

При подсчете числа эффективных проводов в пазу необходимо брать то число пазов, которое занимает рабочая обмотка. В однофазных двигателях с пусковыми элементами рабочая обмотка занимает $^2/_3$ пазов.

Число эффективных проводов в пазу рабочей обмотки вычисляется по формуле

$$N_{пA} = \frac{2w_I}{z_A}, \qquad (55)$$

где z_A — число пазов, занимаемое рабочей обмоткой.

Сечение эффективного провода рабочей обмотки вычисляется по формуле

$$F_A = F_{III} \frac{N_{п\,III}}{N_{пA}}, \qquad (56)$$

где F_A — сечение эффективного провода рабочей обмотки;
F_{III} — сечение эффективного провода обмотки трехфазного электродвигателя;
$N_{пA}$ — число эффективных проводов в пазу рабочей обмотки;
$N_{п\,III}$ — число эффективных проводов в пазу обмотки трехфазного электродвигателя.

Число эффективных проводов в пазу пусковой обмотки принимается в 2 раза бóльшим, а сечение провода в 2 раза меньшим, чем рабочей обмотки:

$$N_{пB} = 2N_{пA};$$

$$F_B = 0{,}5F_A.$$

Ток однофазного электродвигателя определяют по вычисленному сечению для рабочей обмотки и плотности тока в обмотке трехфазного электродвигателя:

$$I_I = F_A \Delta_{III}; \quad \Delta_{III} = \frac{I_{\phi III}}{F_{III}}.$$

(При числе параллельных ветвей $a=1$ и числе параллельных проводов $b=1$ сечение эффективного провода F_A равно сечению элементарного провода s_1.)

Мощность однофазного электродвигателя определяется по формуле

$$P_I = UI_I \cos\varphi\eta. \qquad (57)$$

Подсчитанные произведения к. п. д. на $\cos\varphi$ можно брать из табл. 8.

Таблица 8

Произведения к. п. д. на $\cos\varphi$ для однофазных асинхронных двигателей с пусковыми элементами

Мощность электродвигателя, *вт*	$\eta\cos\varphi$ при $2p=2$	$\eta\cos\varphi$ при $2p=4$	Мощность электродвигателя, *вт*	$\eta\cos\varphi$ при $2p=2$	$\eta\cos\varphi$ при $2p=4$
25	0,29	0,18	250	0,47	0,39
50	0,315	0,22	300	0,49	0,415
75	0,34	0,26	350	0,505	0,435
100	0,365	0,295	400	0,52	0,45
150	0,42	0,33	450	0,53	0,46
200	0,45	0,36	500	0,53	0,46

При мощности электродвигателя свыше 0,5 *квт* значения η и $\cos\varphi$ можно брать по приложению 6 (для трехфазного электродвигателя), снизив мощность, полученную по формуле (57), на 10—15%.

Пример. Пересчитать с трехфазной системы на однофазную обмотку статора электродвигателя типа ПА-22-2: мощность 0,125 *квт*, напряжение 220/380 *в*, ток 0,7/0,41 *а*, синхронная скорость вращения 3 000 *об/мин*, соединение $\Delta/\curlyvee$.

Данные обмотки трехфазного электродвигателя:

Число эффективных проводов в пазу . . . . $N_{пIII} = 270$

Число пазов статора . . . . $z = 18$

Провод марки ПЭВ-2 $\varnothing$ 0,35 *мм*, сечение $s_1 = F = 0{,}0962$ *мм*²

Обмотка однослойная, шаг $y = 1—8$ (см. рис. 40)

Заданное напряжение однофазного электродвигателя 220 *в*.

Рабочая обмотка занимает $^2/_3$ пазов, а пусковая $^1/_3$ пазов ($z_A = 12$; $z_B = 6$).

Обмотку выполняем двухслойной с укорочением шага на $^1/_3$ (см. рис. 63), где

$$y_A = y_B = 6;\ q_A = 6;\ q_B = 3.$$

Определяем число эффективных витков рабочей обмотки однофазного электродвигателя:

$$w_{IA} = w_{III} = \frac{N_{пIII} z}{2m} = \frac{270 \cdot 18}{2 \cdot 3} = 815.$$

Число эффективных проводов в пазу рабочей обмотки

$$N_{пA} = \frac{2w_{IA}}{z_A} = \frac{2 \cdot 815}{12} = 136.$$

Сечение эффективного провода рабочей обмотки

$$F_A = F_{III} \frac{N_{п\,III}}{N_{пA}} = 0{,}0962\ \frac{270}{136} = 0{,}192\ мм^2.$$

Берем провод ПЭВ-2 ∅ 0,49 *мм*; $s_1 = 0{,}188$ *мм*^{2}.

Число эффективных проводов пусковой обмотки

$$N_{п\,B} = 2N_{п\,A} = 2 \cdot 136 = 272.$$

Сечение эффективного провода пусковой обмотки

$$F_B = 0{,}5F_A = 0{,}5 \cdot 0{,}188 = 0{,}0943\ мм^2.$$

Берем провод ПЭВ-2 ∅ 0,35 *мм*.

Определяем плотность тока в обмотке трехфазного электродвигателя:

$$\Delta_{III} = \frac{I_{ф\,III}}{F_{III}} = \frac{0{,}41}{0{,}0962} = 4{,}26\ а/мм^2.$$

Ток однофазного электродвигателя при $\Delta_I = \Delta_{III}$

$$I_I = F_A \Delta_{III} = s_{1A} \Delta_{III} = 0{,}192 \cdot 4{,}26 = 0{,}82\ а.$$

Мощность однофазного электродвигателя

$$P_1 = UI_I \cos\varphi\eta = 220 \cdot 0{,}82 \cdot 0{,}33 = 59{,}5 \approx 60\ вт.$$

Здесь $\eta \cos\varphi$ взято из табл. 8 примерно для мощности $0{,}5\,P_{III} = 0{,}5 \cdot 125 = 62{,}5$ *вт*. Так как расхождение между мощностью, по которой подбирали $\eta \cos\varphi$ по табл. 8, и мощностью, полученной расчетом для однофазного электродвигателя, незначительно, то пересчета мощности не производим.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ. ВЫПОЛНЕНИЕ ОБМОТКИ РОТОРА

Технологический процесс выполнения обмоток можно разделить на следующие операции:

Подготовка статора (фазного ротора) к укладке катушек (секций).

Заготовка пазовой (корпусной) и междуфазной изоляции. Изолировка пазов и нажимных шайб.

Намотка катушек, катушечных групп или полностью фаз обмотки.

Укладка катушек в статор (ротор).

Соединение катушечных групп в фазе. Изолировка мест соединения катушечных групп. Бандажировка и придание формы лобовым частям.

Испытание обмотки.

31. ПОДГОТОВКА СТАТОРА К УКЛАДКЕ КАТУШЕК (СЕКЦИЙ)

После удаления из пазов статора старой обмотки с изоляцией статор очищают от грязи методом продувки сжатым воздухом, пылесосом или ручным мехом и проверяют правильность запрессовки сердечника в корпус, чистоту вентиляционных каналов, отсутствие трещин на станине и т. п.

При необходимости зубцы сердечника статора выравниваются, снимаются заусенцы, производится опиловка выступающих пластин в шлице и внутри паза, после чего статор вторично продувается сжатым воздухом и направляется на изолировку пазов.

Если на статоре имеются жирные пятна от смазочного или другого масла и другие загрязненные места, эти пятна следует до слесарной обработки статора снять ветошью, смоченной в керосине или бензине.

При сильно загрязненном статоре его следует обезжирить путем промывки в ванне, содержащей 3—5-процентный водный раствор каустической соды ($NaOH$), нагретый до температуры 50—60° С, или в растворах с другими обезжиривающими веществами. Обезжиренный статор вытирается насухо ветошью.

32. ЗАГОТОВКА ИЗОЛЯЦИИ. ИЗОЛИРОВКА ПАЗОВ СТАТОРА. ИЗОЛИРОВКА НАЖИМНЫХ ШАЙБ

Пазовой изоляцией для электродвигателей нормального исполнения мощностью до 100 *квт* и напряжением до 500 *в* обычно являются электрокартон (прессшпан) толщиной 0,1—0,3 *мм*, хлопчатобумажная, шелковая или

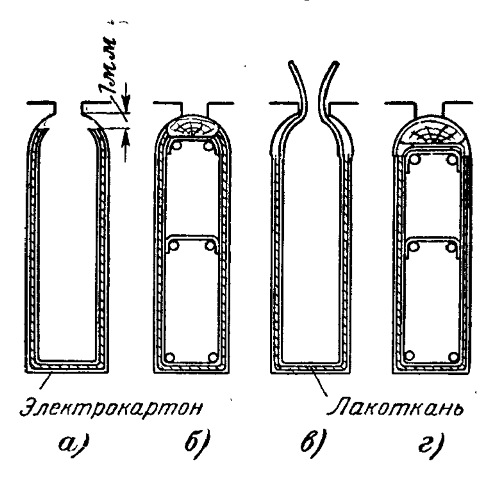


Рис. 78.

а — вид пазовой коробочки до укладки провода; *б* — то же после укладки провода; *в* — вид пазовой коробочки до укладки провода при различной ширине заготовок изоляции; *г* — то же после укладки провода.

стеклянная лакоткань, кабельная бумага и пленкокартон.

Чаще всего пазовая изоляция (коробочка или гильза) изготовляется из двух слоев электрокартона и одного слоя лакоткани. Заготовку пазовой изоляции производят на рычажных ножницах, вмонтированных в стол, с направляющей и установочной линейкой и прижимной планкой. Ширина заготовок зависит от периметра паза и может быть одинаковой для всех трех слоев при форме коробочки по рис. 78,*а* и *б* или разной при форме коробочки по рис. 78,*в* и *г*. Заготовка коробочки по рис. 78,*в* и *г* для верхнего слоя производится из листов картона на 20 *мм* шире, чтобы при выходе из шлица паза в процессе укладки обмотки электрокартон

предохранял изоляцию проводов от повреждения, а также для того, чтобы края коробочки перекрывали друг друга, образуя этим между катушкой и деревянным клином двойной слой.

Пазовая коробочка по рис. 78,*а* и *б* применяется при выполнении обмотки проводом марок ПЭЛБО, ПЭЛШО и т. п. Пазовую коробочку по рис. 78,*в* и *г* рекомендуется применять при выполнении обмотки проводом с эмалевой изоляцией, а также в электродвигателях с относительно длинными пакетами стали статора и острыми краями зубцов.

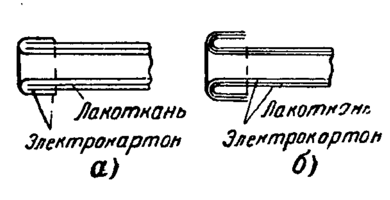


Рис. 79.
а — манжета, образованная верхним слоем пазовой коробочки; *б* — манжета, образованная тремя слоями пазовой коробочки.

Заготовка верхнего слоя пазовой изоляции берется больше длины сердечника статора на 20—40 *мм*, чтобы по краям коробочки можно было сделать манжеты, которые предохраняли бы выходящие из паза провода катушек от механических повреждений, а сама коробочка выступала по обеим сторонам паза на 5—10 *мм*. Длина заготовки среднего слоя лакоткани и нижнего слоя электрокартона берется на 10—20 *мм* короче длины заготовки верхнего слоя, так как манжета обычно образуется только верхним слоем пазовой изоляции (рис. 79,*а*).

Для увеличения прочности выступающих концов коробочки иногда манжету делают из всех слоев пазовой изоляции (рис. 79,*б*).

Пазовые коробочки с трехслойной манжетой рекомендуется применять в тех статорах, где не предусмотрена установка опорных изоляционных колец из электрокартона на торцах сердечника статора или нельзя применить изолировку нажимных шайб способом, указанным ниже.

Заготовки пазовых коробочек обжимают на оправке и укладывают в пазы статора, расправляя их при этом деревянной оправкой так, чтобы они плотно облегали паз. Форма оправки должна соответствовать форме паза с размерами меньше на толщину пазовой изоляции. Вылеты коробочек с обеих сторон статора должны быть одинаковыми.

Недостатком описанной выше трехслойной пазовой изоляции является большая толщина коробочки, что снижает коэффициент заполнения паза, особенно в малых машинах. В последнее время широкое применение нашли новые виды изоляционных материалов, такие как, например, пленкокартон на триацетатной пленке, пленка типа лавсан и др., позволяющие сделать пазовую коробочку более тонкой и эластичной, или стеклолакоткань и электрокартон, позволяющие повысить нагревостойкость изоляции, и др.

Нажимные шайбы сердечника статора изолируются полосками электрокартона, подклеиваемыми изоляционным лаком или прикрепляемыми окантовочными нитками. Толщину и количество полосок электрокартона следует подбирать так, чтобы они могли служить опорой для выходящих из паза концов изоляционных коробочек, одновременно предохраняя их от разрыва при отгибании лобовых частей обмоток.

Кроме пазовой изоляции, должны быть заготовлены прокладки из электрокартона толщиной 0,3—0,5 *мм* для подклиновой изоляции. Эти прокладки должны быть шире паза в его верхней части, чтобы придать ей вид скобочки (рис. 78).

Прокладки из электрокартона толщиной 0,3 или 0,2 *мм* в два слоя с прокладкой лакоткани между ними применяются в двухслойных обмотках для укладки между верхней стороной нижней катушки и нижней стороной верхней катушки. Прокладка должна быть шире паза в его средней части, чем обеспечивается надежное разделение слоев обмотки (рис. 78,*б* и *г*).

Прокладки из электрокартона толщиной от 0,1 до 0,4 *мм* в зависимости от габаритов электродвигателя и прокладки из лакоткани, склеиваемые попарно или сложенные вместе, кладутся между катушечными группами в качестве междуфазной изоляции в лобовых частях обмотки. В электродвигателях малой мощности междуфазной изоляцией может служить один слой лакоткани. Размеры прокладок для междуфазной изоляции по ширине определяются вылетом лобовой части, а по длине и форме — шагом и видом обмотки. Обычно обмотчик получает заготовки прокладок и в процессе укладки обмотки придает им нужную форму.

33. НАМОТКА КАТУШЕК

Намотку катушек производят на простых или универсальных раздвижных шаблонах с ручным или механическим приводом.

На рис. 92 показан раздвижной шаблон, позволяющий наматывать сразу 12 катушек, что дает возможность выполнять большинство обмоток без пайки схемы. Шаблон состоит из планки с прорезью, двух полукруглых головок с 12 канавками на каждой для размещения катушек в процессе намотки, двух винтов для крепления головок к планке и рукоятки для вращения в случае ручного привода.

Для настройки шаблона необходимо вычислить или практическим путем определить среднюю длину витка. Опытные обмотчики по заданному вылету лобовых частей и шагу обмотки сами могут определить среднюю длину витка, а менее опытным даются готовые размеры витка. Необходимо тщательно определять среднюю длину витка, так как заниженные размеры создадут трудности при укладке катушек в статор, а завышенные повлекут за собой большой вылет, что приведет к перерасходу меди и повреждению обмотки при надевании подшипниковых щитов. Как правило, зазор между лобовыми частями обмотки и подшипниковым щитом должен быть не менее 10 *мм*.

Средняя длина витка мягкой секции (катушки) определяется по формуле

$$l_{м} = 2(l_{л} + L_{п}),\ мм,$$

где $l_{л}$ — длина одной лобовой части мягкой секции (катушки);

$L_{п}$ — полная длина сердечника статора.

Длина одной лобовой части мягкой секции (катушки) вычисляется по формуле

$$l_{л} = A\tau_{у} + Б,\ мм.$$

Средняя ширина секции (катушки) $\tau_{у}$ в свою очередь определяется из формулы

$$\tau_{у} = \frac{\pi(D_{в} + h_{z1})\,y}{z_{1}},\ мм,$$

где $D_в$ — внутренний диаметр статора;

h_{z1} — высота зубца сердечника статора;

y — шаг обмотки по пазам.

Значения коэффициентов A и постоянной величины $Б$ выбираются по табл. 9.

В отдельных случаях при недостаточном опыте в определении средней длины витка рекомендуется изготовить пробную катушку и проверить правильность размеров вкладыванием ее в статор электродвигателя в соответствии с заданным шагом.

Таблица 9

2р	При намотке сердечника вне станины		При намотке сердечника, запрессованного в станину	
	А	Б, мм	А	Б, мм
2	1,25	20	1,30	30
4	1,30	20	1,35	30
6	1,40	20	1,45	30
8	1,50	20	1,55	30

При намотке катушек на раздвижном шаблоне, имеющем большой вылет головок, между свободными концами головок следует ставить распорную деревянную планку, чем обеспечить параллельность головок шаблона и одинаковый размер катушек.

Количество наматываемых за одну операцию катушек зависит от принятого метода выполнения обмотки. При выполнении обмотки с пайкой схемы рекомендуется наматывать полностью катушечную группу, а при выполнении обмотки без пайки схемы — всю фазу.

Для подсчета числа витков целесообразно намоточный шаблон оборудовать счетчиком скорости вращения (оборотов), а намоточные станки — еще и устройством для автоматического останова станка при намотке заданного числа витков.

Стороны намотанных катушек временно скрепляются лентой. Комплекты катушек передаются обмотчикам для дальнейших операций.

34. ОСОБЕННОСТИ НАМОТКИ КАТУШЕК ДЛЯ ПУСКОВОЙ ОБМОТКИ СТАТОРА ОДНОФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ СО ВСТРОЕННЫМ ПУСКОВЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Намотка катушек для пусковой обмотки однофазного электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением несколько отличается от намотки катушек пусковых обмоток других типов однофазных электродвигателей. В каждой катушке пусковой обмотки электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением должно быть определенное число витков, намотанных бифилярно. Поэтому катушка состоит из двух секций: секции с меньшим числом витков и секции с бóльшим числом витков. При укладке в статор одна из секций разворачивается на 180°, в результате чего и получается в каждой катушке бифилярная катушка с числом витков, равным удвоенному числу витков меньшей (по числу витков) секции.

Секции с бóльшим и меньшим числом витков наматываются обычным способом и перевязываются вязками.

Рабочие и пусковые обмотки однофазных электродвигателей, как правило, выполняются без пайки схемы (см. § 39), поэтому следует весь комплект катушек для рабочей или пусковой обмотки готовить из целого провода, без разрывов между катушечными группами.

В зависимости от принятого способа укладки катушечных групп в статор (по или против часовой стрелки) и требуемого направления вращения электродвигателя катушки пусковой обмотки начинают мотать с секций, имеющих меньшее число витков, или с секций с бóльшим числом витков, или чередуя последовательность намотки тех и других секций в катушках катушечной группы.

На рис. 80,*а* показан комплект катушек для пусковой обмотки электродвигателя АОЛБ 31/4. Каждая катушка начинается с секции *1*, состоящей из большего числа витков, затем расположена секция *2* с меньшим числом витков. Стороны секций скреплены вязкой *4*. Катушечная группа состоит из одной катушки, всего в обмотке четыре катушечные группы. Между катушечными группами в процессе намотки катушек надевают на провод линоксиновые изоляционные трубки *3*.

На рис. 80,*б* показан комплект катушек для пусковой обмотки электродвигателя того же типа АОЛБ 31/4, но с другой последовательноестью намотки катушек. Здесь намотка катушек начата с секции, состоящей из меньшего числа витков.

Комплект катушек для пусковой обмотки электродвигателя АОЛБ 31/2 показан на рис. 80,*в*. Здесь последовательность намотки секций с бо́льшим и меньшим числов витков чередуется. Сначала наматывается секция 1-й катушки 1-й катушечной группы, состоящая из большего числа витков, затем — секция, состоящая из меньшего числа витков; секции 2-й катушки 1-й катушечной группы наматываются на шаблоне в обратном порядке, т. е. сначала выполняется секция с меньшим числом витков, а затем — с бо́льшим числом витков. 2-я катушечная группа обмотки наматывается аналогично 1-й катушечной группе.

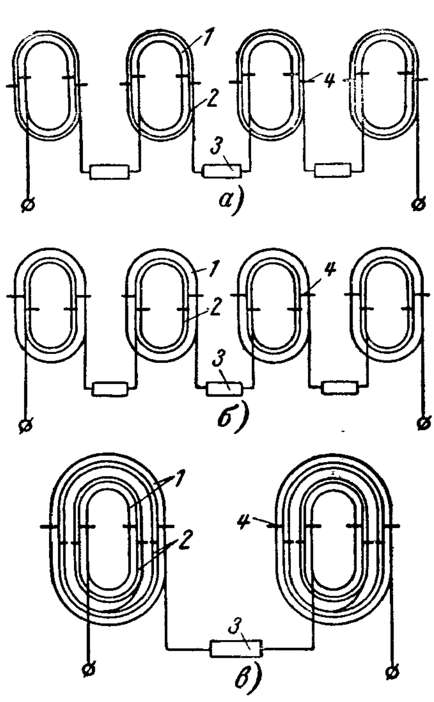


Рис. 80. Комплект катушек для пусковой обмотки.

а — электродвигателя АОЛБ 31/4 (начало укладки с основной секции); *б* — электродвигателя АОЛБ 31/4 (начало укладки с «бифилярной» секции); *в* — электродвигателя АОЛБ 31/2.

Между катушечными группами в процессе намотки катушек ставится изоляционная трубка *3*. Стороны каждой секции скрепляются вязками *4*.

35. УКЛАДКА КАТУШЕК (СЕКЦИЙ) В СТАТОР

До начала укладки катушек обмотчик должен внимательно изучить обмоточно-расчетные данные обмотки, составленные на основании заводских обмоточных таб-

лиц или данных дефектировки и поверочного или полного расчета.

Форма обмоточно-расчетной карточки.

ОБМОТОЧНО-РАСЧЕТНАЯ КАРТОЧКА

Ремонтный №__________

Тип электродвигателя____________________

$P=$ ____________________ *квт*

$U=$ ____________________ *в*

$I=$ ____________________ *а*

$n=$ ____________________ *об/мин*

$z=$ ____________________

Обмоточный провод: марка__________ диаметр__________

Число параллельных проводов____________________

Витков в катушке (секции) ____________________

Витков в пазу____________________

Шаг ____________________

Соединение катушечных групп (число параллельных ветвей)__________

Число групп в фазе и катушек в группе ____________________

Вид обмотки ____________________

Соединение фаз ____________________

Вылет обмотки____________________

Обмотчик____________________

Дата ____________________

Подпись____________________

В строке „Соединение катушечных групп" указывается соединение в параллельные ветви или соединение без них. Например, последовательное: 2 || *в*; 3 || *в* и т. д.

В строке «Число групп в фазе и катушек в группе» указывается число катушечных групп или число катушечных полугрупп при выполнении однослойной обмотки «вразвалку» на одну фазу. Например: 6 одинарных, 3 двойных, 2 тройных, 2 одинарных и 2 двойных и т. п.

В строке «Соединение фаз» указывается вид соединения фаз: $\triangle/\curlywedge$; $\triangle$; $\curlywedge$.

К остальным данным обмоточно-расчетной карточки объяснений не требуется.

При выполнении обмоточных работ обмотчик должен пользоваться обычным монтерским инструментом (пло-

скогубцы, кусачки, деревянный молоток, нож) и некоторым специальным инструментом.

Для уплотнения проводов в пазу применяется стальная оправка (рис. 81,*а*), при помощи которой обмотчик периодически уплотняет провода.

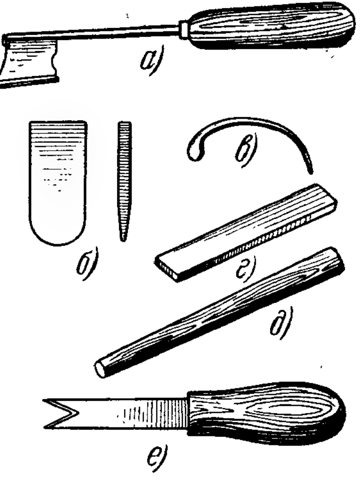


Рис. 81.

а — стальная оправка; *б* — фибровая клиновндная пластина; *в* — проволочный крючок; *г* и *д* — колодочкн; *е* — специальный иож.

При обмотке из эмалированного провода осаживание и уплотнение проводов производятся текстолитовой или фибровой прокладкой. Для придания параллельности уложенным проводам применяется фибровая клиновидная пластина (рис. 81,*б*). Для придания соответствующей формы лобовым частям обмотки также применяется фибровая клиновидная пластинка (рис. 81,*б*).

Для обрезки электрокартона, выступающего из шлица паза (при форме пазовой коробочки по рис. 78,*в* и *г*), применяется специальный нож (рис. 81,*е*).

Кроме приведенных инструментов и приспособлений, обмотчик должен иметь проволочные крючки для протаскивания ленты при бандажировке лобовых частей обмотки и ножницы для срезывания выступающей междуфазной изоляции.

Наиболее распространенным способом выполнения обмотки при полузакрытых пазах является укладка через шлиц паза по одному проводу (всыпная обмотка); при этом по мере укладки витков следует фибровой клиновидной пластиной проводить вдоль паза для устранения перекрещивания проводов и легким нажатием оправкой, вводимой в паз с его торца, периодически уплотнять провода.

После укладки катушек и уплотнения проводов на верхней стороне катушки кладут изоляционную про-

кладку и деревянный клин, удерживающий обмотку в пазах.

Если верхний слой пазовой коробочки выступает из шлица паза, то после укладки обмотки эту изоляцию срезают специальным ножом и верхний слой коробочки загибают внутрь паза (см. рис. 78,*г*).

Деревянные клинья предварительно заготавливаются из сухого бука или березы. Длина клиньев должна быть больше длины сердечника статора на 10—20 *мм* и равна или немного меньше длины пазовой коробочки. Толщина клина зависит от формы верхней части паза и его заполнения, но не меньше 2 *мм*. Для придания клиньям влагостойкости рекомендуется проваривать их в олифе при температуре 120—140° С в течение 3 *ч* или до прекращения образования пены и пузырьков на поверхности олифы, а затем в течение 8—10 *ч* просушивать при температуре 110—115° С.

Для малых машин вместо деревянных клиньев можно применять прокладки из электрокартона толщиной 0,5—1 *мм*.

В лобовых частях между катушечными группами разных фаз кладутся прокладки из электрокартона и лакоткани. После расклинивания обмотки ее лобовые части ударами молотка через деревянную или фибровую прокладку (колодочку) отгибаются в сторону, противоположную ротору.

36. СБОРКА СХЕМЫ, ИЗОЛИРОВКА МЕСТ СОЕДИНЕНИЙ. БАНДАЖИРОВКА ОБМОТКИ

Если фаза обмотки намотана отдельными катушками, сборку схемы начинают с последовательного соединения катушек в катушечные группы. В целях сокращения числа паек катушечные группы наматываются из целого куска провода, что повышает производительность труда и экономит материалы.

За начала фаз принимают выводы катушечных групп, выходящие из пазов, расположенных вблизи выводного щитка; это уменьшает длину выводных проводов, особенно у обмоток, имеющих четыре и больше полюсов. Разумеется, расстояние между началами фаз, равное $2q$, должно быть сохранено. Выводы катушечных групп, принятые за начала фаз, отгибаются к телу статора и соединяются катушечные группы каждой фазы в соот-

ветствии со схемой методом скрутки предварительно зачищенных от изоляции концов проводов.

Предварительно соединенная схема обмотки проверяется мегомметром на отсутствие замыканий на корпус и между отдельными фазами (обмотками). Кроме того, проверяется и правильность соединения схемы при помощи стального шарика, вертушки или компаса. Если обмотка соединена правильно, стрелка компаса, передвигаемого по расточке статора, отметит число пар полюсов электродвигателя, причем на каждую пару полюсов будет приходиться одинаковое число пазов. Вместо компаса можно приспособить стальную пластинку или ученическое перо, которые в магнитном поле статора намагничиваются и некоторое время удерживают на концах постоянную разноименную полярность. Вращение стального шарика по окружности расточки статора и вращение вертушки, помещенной в центре расточки статора, также покажут правильность соединения схемы.

При проверке правильности соединения схемы при помощи компаса к фазам статора поочередно подают постоянный ток от аккумуляторной батареи. При проверке обмотки стальным шариком или вертушкой статор кратковременно подключают к сети при пониженном или номинальном напряжении электродвигателя.

Если имеется аппарат СМ-1 (СМ-2, СМ-4 или ЕЛ-1), проверку предварительно собранной схемы обмотки производят этим аппаратом.

Перед пайкой или сваркой соединений схемы рекомендуется проверить обмотку на витковые замыкания в пазах. После проверки производится сварка или пайка всех соединений обмотки, а к началам и концам фаз присоединяют выводные провода из гибкого провода марки ПРГ, подключаемые к зажимным шпилькам выводного щитка. Сечение выводных проводов выбирают в зависимости от условий охлаждения, величины и вида нагрузки электродвигателя (табл. 10), а сечение шпилек выводного щитка — в зависимости от нагрузки электродвигателя (табл. 11).

Если конструкцией электродвигателя выводной щиток не предусмотрен, то выводные провода выводятся через окна или отверстия в станине статора и, где это предусмотрено, крепятся к зажимным планкам. Кабель-

Таблица 10

Сечение выводных проводов обмоток электрических двигателей

Сечение медных проводов, *мм²*	Допустимая нагрузка, *а*			
	продолжительная		кратковременная	
	открытые вентилируемые машины	закрытые невентилируемые машины	открытые вентилируемые машины	закрытые невентилируемые машины
2,5	26	23	39	30
4	40	33	60	46
6	58	47	87	58
10	84	67	140	110
16	120	100	220	170
25	160	140	320	225
35	200	175	430	350
50	255	220	580	470

ные наконечники к концам выводных проводов электродвигателей мощностью 20 *квт* и выше присоединяются пайкой или электросваркой.

Для небольших по мощности электродвигателей в качестве выводов допускается использование концов и на-

Таблица 11

Диаметры выводных шпилек электрических двигателей

Диаметр выводной шпильки, *мм*	Наибольший допустимый ток, *а*	Диаметр выводной шпильки, *мм*	Наибольший допустимый ток, *а*
М 4	14	М 10	200
М 5	25	М 12	300
М 6	48	М 14	500
М 8	100	М 16	800

чал фаз обмотки, которые должны быть изолированы линоксиновой трубкой, лакотканью, киперной или тафтяной лентой и выведены на выводной щиток. При отсутствии выводного щитка использование обмоточного провода для выводов не допускается, так как в этих условиях может легко произойти обрыв провода.

При небольшом сечении проводов соединение схемы обмотки производится электросваркой. К зачищенным и предварительно скрученным проводам касаются мед-

ным электродом, имеющим форму стержня или зажима, а к концу скрутки — угольным электродом (рис. 82).

Исходя из безопасных условий работы, напряжение электросварочного трансформатора должно быть от 12 до 36 *в*, а мощность его в зависимости от количества одновременно работающих точек и сечения свариваемых проводов от 0,25 *ква* и выше.

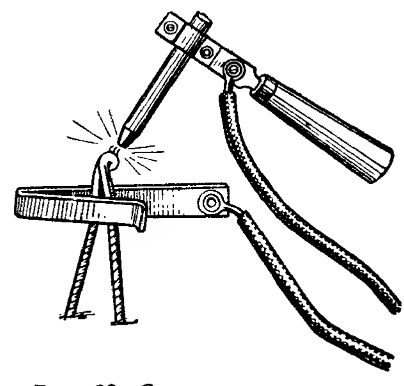


Рис. 82. Соединение проводов электросваркой.

При соединении схемы обмотки пайку проводов производят в большинстве случаев оловянно-свинцовыми припоями ПОС-50, ПОС-40 (олова 40%, свинца 60%) и ПОС-30, а в качестве флюса—канифоль, облегчающую облуживание и последующую пайку. Провода до пайки должны быть зачищены шкуркой, а длина пайки должна быть не менее 15 *мм*.

Места соединений после пайки или сварки тщательно изолируются полосками лакоткани шириной 15—20 *мм* и тафтяной лентой или предварительно надетыми и сдвинутыми в сторону на время сварки (пайки) изоляционными трубками.

После изолировки соединительные провода укладываются на лобовой части обмотки, бандажируются киперной или тафтяной лентой «вперекрой» или «вразбежку» и окончательно укладываются по месту.

Начала и концы фаз нумеруются согласно ГОСТ (C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6) и выводятся на выводной щиток так, чтобы удобно было производить соединение фаз в звезду или треугольник, поэтому их располагают, как показано на рис. 83.

При выполнении обмотки из алюминиевых обмоточных проводов следует учитывать, что болтовые и прижимные контактные соединения алюминий — алюминий и алюминий — медь неустойчивы, так как поверхностный слой алюминия, соединяясь с кислородом воздуха, образует малоэлектропроводную и тугоплавкую пленку окиси, а алюминий и медь образуют гальванопару, разру-

шающую контакт этих соединений. Поэтому только сварка дает надежное и устойчивое соединение алюминиевых проводов с алюминиевыми и медными проводами.

Достаточно надежное и прочное соединение алюминиевых проводов с алюминиевыми и медными проводами

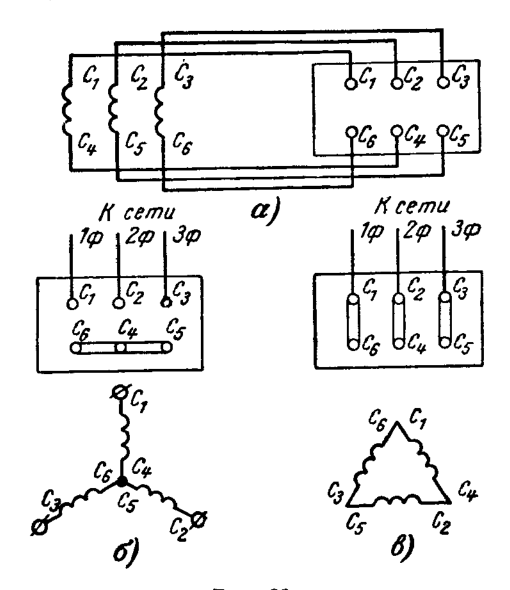


Рис. 83.
а — расположение выводов фаз обмотки на щитке; *б* — соединение фаз в звезду; *в* — соединение фаз в треугольник.

может обеспечить также пайка с применением специальных припоев и флюсов.

В последнее время изысканы способы холодной сварки алюминиевых проводов при помощи специальных клещей. В результате сжатия проводов при высоком давлении образуется прочное, монолитное соединение их.

Способ соединения алюминиевых проводов электросваркой[1]. Сваривание проводов осуществляется за счет тепла, выделяемого в месте их контакта с токоведущими

[1] И. Р. Лихциер, Методы соединения алюминиевых проводов и шин между собой и оконцевание их медью, Материалы научно-технического совещания ЦИНТИ, 1960.

графитовыми губками ручных клещей и графитовым электродом, которые присоединяют ко вторичной обмотке трансформатора напряжением 4—8 *в* и мощностью 3—5 *ква*. Сварка производится без применения флюса.

Указанным методом можно сваривать круглые и прямоугольные алюминиевые провода сечением от 0,2 *мм*² и более. Длительность сварки одножильных проводов диаметром 1 *мм* не превышает 2—3 *сек*; при этом длина сварного соединения должна быть не менее 1,5—2 диаметров провода. Перед сваркой концы круглых проводов соединяются скруткой.

Для пайки алюминиевых проводов могут быть применены следующие припои и флюсы.

Припой: олова 90%, цинка 10%. Температура плавления выше 200° С. Флюс: фтороборат кадмия 10 ±0,5%, фтороборат аммония 8±0,5% и триэтаноламин 82±1%.

Во избежание коррозии металла удаление остатков флюса осуществляется промывкой[1].

Припой: олова 55%, цинка 25%, кадмия 20%. Температура плавления 200° С.

Или олова 40%, цинка 25%, алюминия 15%, кадмия 20%. Температура плавления 250° С.

Флюс: хлористого бария (безводного) 48%; хлористого калия 29%; хлористого натрия 19%; фтористого кальция 4%.

Остатки флюса должны тщательно удаляться.

Использование алюминиевых обмоточных проводов в качестве выводов к выводному щитку не рекомендуется из-за их хрупкости. Выводы из многожильного провода марки АПРГ должны иметь медные кабельные наконечники, присоединенные сваркой или пайкой.

37. ИСПЫТАНИЕ ОБМОТКИ

После намотки статора производится испытание электрической прочности изоляции.

Изоляция обмотки относительно корпуса электродвигателя и между фазами должна выдерживать испытательное напряжение в течение 1 *мин*.

---

[1] Г. Я. Шкилько, О производстве асинхронных двигателей с алюминиевой обмоткой, «Электропромышленность и приборостроение», 1960, № 15.

Испытательное напряжение по существующим нормам должно быть равно двойному номинальному напряжению электродвигателя плюс 1 000 *в* ($2U+1\,000$ *в*).

Перед испытанием проверяется наличие обрыва в фазах обмотки.

Окончательная проверка правильности собранной схемы и витковых замыканий производится на аппарате СМ-1 (СМ-2 и др.) или же другими описанными в технической литературе способами.

38. ПРИМЕРЫ УКЛАДКИ КАТУШЕК В СТАТОР И СБОРКИ СХЕМ РАЗНЫХ ВИДОВ ОБМОТОК

А. ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Требуется намотать однослойную секционную обмотку по схеме рис. 84 со следующими данными: $z=24$; $2p=4$; $q=2$; $y=6$; $a=1$.

Катушечная группа данной обмотки состоит из двух катушек; фаза состоит из двух катушечных групп.

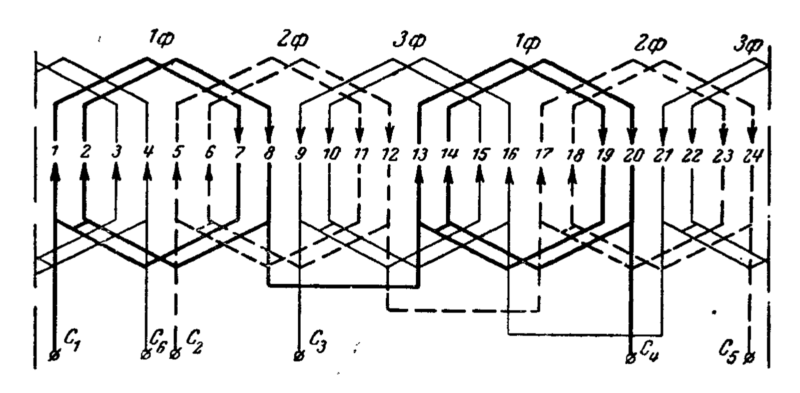


Рис. 84. Схема однослойной секционной обмотки. $z=24$; $2p=4$; $q=2$; $y=6$.

Берется катушечная группа, где левые стороны катушек, если смотреть со стороны схемы, укладываются в любые два рядом расположенных паза, считая их за 1-й и 2-й порядковый номер. Правые стороны катушек укладываются согласно шагу в 7-й и 8-й пазы.

Для того чтобы наметить начало 1-й фазы, левый вывод из 1-й катушечной группы загибают к телу статора и, двигаясь по расточке статора против часовой стрелки, пропускают q пазов, т. е. два паза, и укладывают вторую катушечную группу левой стороной в 5-й и 6-й, а правой стороной в 11-й и 12-й пазы. Снова пропустив два паза, укладывают третью катушечную группу левой стороной в 9-й и 10-й, а правой стороной в 15-й и 16-й пазы.

Вложив еще три катушечные группы, приступают к соединению катушечных групп.

Предварительно определяют начало 2-й и 3-й фаз при расстоянии между началом 1-й и началом 2-й, началом 2-й и началом 3-й фаз, равном $2q$.

Началом 2-й фазы будет вывод, выходящий из 5-го паза, а началом 3-й фазы — вывод, выходящий из 9-го паза. Чтобы правильно соединить между собой катушечные группы, следует учитывать, что в однослойных секционных обмотках катушечные группы соединяются: конец первой катушечной группы — с началом второй, конец второй — с началом третьей катушечной группы и т. д.

Соединяют (в 1-й фазе): конец первой катушечной группы, выходящий из 8-го паза, — с началом четвертой по ходу намотки катушечной группы, начало которой расположено от начала первой катушечной группы на расстоянии двух диаметральных шагов, а конец этой катушечной группы, выходящий из 20-го паза, будет концом 1-й фазы.

Следует различать порядковые номера катушечных групп своей фазы и порядковые номера катушечных групп всей обмотки независимо от принадлежности их к той или иной фазе. Чтобы упростить соединение схемы, обмотчики часто нумеруют катушечные группы подряд слева направо (при укладке обмотки против часовой стрелки), а при определении катушечных групп данной фазы пользуются следующим правилом.

Если первую катушечную группу 1-й фазы считать первой, то следующие катушечные группы этой же фазы будут: 4-я, 7-я, 10-я и т. д., т. е. номер последующей катушечной группы будет равен номеру предыдущей катушечной группы плюс три единицы.

Если первая катушечная группа 2-й фазы будет иметь порядковый номер 2, то следующие катушечные группы этой фазы будут иметь номера: 5-й, 8-й, 11-й и т. д.

Если первая катушечная группа 3-й фазы будет иметь номер 3, то следующие катушечные группы этой фазы будут иметь номера: 6-й, 9-й, 12-й и т. д.

Соединение катушечных групп во 2-й и 3-й фазах производится аналогично соединению катушечных групп в 1-й фазе (рис. 84).

Выполненная в указанной последовательности обмотка будет иметь некоторую несимметрию лобовых частей, так как, укладывая первую катушечную группу 1-й фазы, здесь пренебрегли тем, что левая сторона ее должна быть вложена в 1-й 2-й пазы после того, как будет вложена правой стороной последняя (шестая) катушечная группа в 3-й и 4-й пазы.

Чтобы выполнить эту обмотку с симметричным расположением катушек в лобовых частях, следует первую катушечную группу укладывать в пазы только правыми сторонами катушек, а левые стороны вложить временно (при открытых пазах) или оставить приподнятыми до тех пор, пока не будут вложены в 3-й и 4-й пазы правые стороны катушек последней катушечной группы.

Однослойные секционные обмотки небольших габаритов в большинстве случаев выполняются с несимметричным расположением катушек в лобовых частях, что допустимо. Обмотки средних и крупных электродвигателей должны быть выполнены с соблюдением симметрии лобовых частей.

Требуется намотать однослойную секционную обмотку «вразвалку» согласно рис. 85.

Данные обмотки: $z=24$; $2p=2$; $q=4$; $y=10$.

Каждая фаза данной обмотки состоит из двух катушечных полугрупп, а каждая полугруппа — из двух катушек.

Укладка катушечных полугрупп производится следующим образом.

Первую катушечную полугруппу 1-й фазы укладывают левой стороной в 1-й и 2-й пазы, а правой стороной — в 11-й и 12-й пазы.

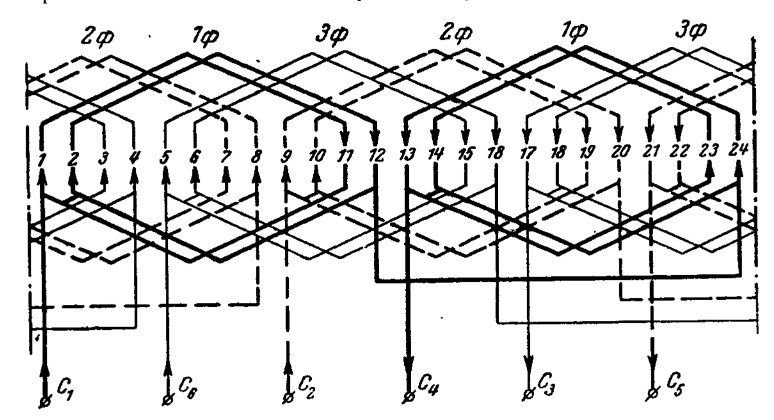


Рис. 85. Схема однослойной секционной обмотки «вразвалку».
$z=24$; $2p=2$; $q=4$; $y=10$.

Катушечную полугруппу следующей фазы левой стороной укладывают через $q:2$ пазов в 5-й и 6-й пазы, т. е. пропустив два паза по ходу намотки статора, а правой стороной — в 15-й и 16-й пазы.

Катушечную полугруппу последующей фазы укладывают левой стороной в 9-й и 10-й пазы (также пропустив два паза), а правой стороной — в 19-й и 20-й пазы.

В таком же порядке укладывают остальные катушечные полугруппы. Затем размечают начала фаз, расположенные на расстоянии $2q$ друг от друга. В данном случае начало 1-й фазы расположено в 1-м пазу, начало 2-й фазы — в 9-м, а начало 3-й фазы — в 17-м пазу.

После укладки катушечных полугрупп их попарно соединяют в каждой фазе: конец первой катушечной полугруппы соединяется с концом второй, начало второй — с началом третьей и т. д.

Как и в предыдущем примере, нумерация катушечных полугрупп производится порядковыми номерами; соединяют катушечные полугруппы в каждой фазе следующим образом.

Конец первой катушечной полугруппы 1-й фазы соединяют с концом четвертой катушечной полугруппы, начало которой будет концом 1-й фазы.

Конец третьей катушечной полугруппы 2-й фазы соединяют с концом шестой катушечной полугруппы, начало которой будет концом 2-й фазы.

Конец пятой катушечной полугруппы 3-й фазы соединяют с концом второй катушечной полугруппы (вместо восьмой она имеет второй номер, так как в обмотке всего шесть катушечных полугрупп). Начало второй катушечной полугруппы будет концом 3-й фазы.

В данной обмотке (рис. 85) катушечные полугруппы фаз чередуются в такой последовательности: 1-я фаза, 3-я фаза, 2-я фаза и т. д.

Выполненная указанным способом обмотка будет иметь допустимую несимметрию лобовых частей, так как первая и вторая катушечные полугруппы вложены в пазы обеими сторонами.

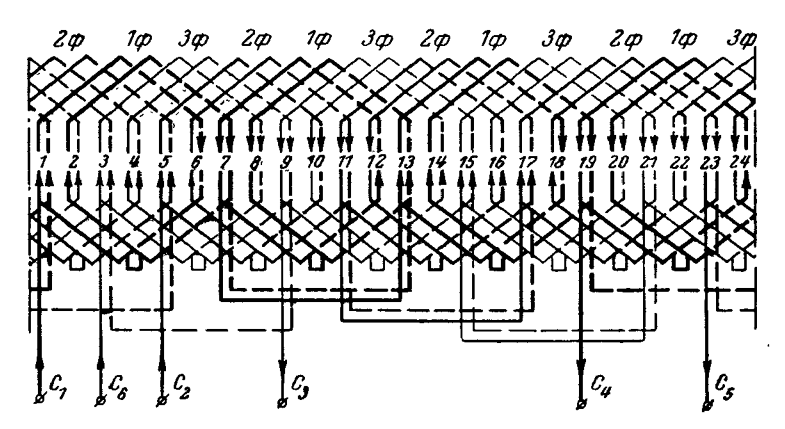


Рис. 86. Схема двухслойной обмотки.
$z=24$; $2p=4$; $q=2$; $y=5$.

Чтобы выполнить данную обмотку с симметричным расположением катушек в лобовых частях, следует левые стороны первой и второй катушечных полугрупп укладывать в пазы после того, как будут заполнены 3-й, 4-й, 5-й и 6-й пазы правыми сторонами последних по ходу намотки катушечных полугрупп. Обмотки средних и крупных электродвигателей должны быть выполнены с соблюдением симметрии лобовых частей.

Требуется намотать двухслойную обмотку со следующими данными: $z=24$; $2p=4$; $q=2$; $y=5$ (рис. 86).

Каждая фаза обмотки здесь имеет четыре катушечные группы, где каждая состоит из двух катушек.

Выполнение двухслойной обмотки начинается с укладки нижних сторон катушек в пазы по шагу обмотки.

Первую катушечную группу 1-й фазы (любую берем) правой стороной (если смотреть со стороны схемы) укладывают в 6-й и 7-й пазы, а левые стороны, которые должны заполнить верхнюю часть 1-го и 2-го пазов, оставляют неуложенными.

Следующую катушечную группу (по схеме обмотки она принадлежит к 3-й фазе) правой стороной укладывают в 8-й и 9-й пазы, а их левые стороны, которые должны быть уложены в верхнюю часть 3-го и 4-го пазов, оставляют неуложенными.

Аналогично укладываются и последующие катушечные группы всех фаз.

При выполнении как однослойных, так и двухслойных обмоток катушечные группы не нумеруются, а укладка их производится подряд и только после укладки всех катушечных групп производится распределение их по фазам.

Примечание. По мере укладывания катушек в пазы между нижними и верхними сторонами катушек, а также между клиньями и проводом верхней катушки кладут изоляционные прокладки.

Соединение катушечных групп в фазе производится следующим образом: конец 1-й катушечной группы соединяется с концом 2-й, начало 2-й — с началом 3-й и т. д. Перед соединением следует определить расположение начал фаз, которые, кроме обмоток с дробным q, располагаются через число пазов, равное $2q$. В данном случае $2q=2\cdot 2=4$, откуда началами фаз будут выводы катушечных групп из 1-го, 5-го и 9-го пазов. Во всех обмотках каждая четвертая по ходу намотки статора катушечная группа относится к одной определенной фазе, поэтому достаточно знать, к какой фазе относится одна катушечная группа, чтобы найти остальные катушечные группы этой фазы и, определяя начала фаз, тем самым устанавливать и место 1-й катушечной группы каждой фазы.

Такое распределение катушечных групп в фазе действительно и для однослойных обмоток «вразвалку», с той лишь разницей, что вместо катушечных групп по окружности статора будут размещены в такой же последовательности катушечные полугруппы.

Соединив катушечные группы каждой фазы, получим, что выводы, выходящие из 19-го, 23-го и 3-го пазов, будут концами 1-й, 2-й и 3-й фаз, которые размещены в обмотке через $2q$ пазов.

Выполненная таким образом двухслойная обмотка является симметричной не только по конструкции, но и по размещению лобовых частей. Определение шага по лобовой части таких обмоток представляет некоторую трудность, поэтому они часто называются обмотками с «закрытым шагом».

Выполнение обмоток статоров небольших по габаритам электродвигателей с «закрытым шагом» является затруднительным, так как находящиеся в расточке статора неуложенные верхние стороны первых катушечных групп мешают укладывать последующие катушечные группы. Поэтому для облегчения выполнения обмотки и повышения производительности труда двухслойные обмотки небольших электродвигателей могут быть выполнены следующим способом.

Первые катушечные группы сначала укладывают обеими сторонами в нижние части пазов. Число катушек, верхние и нижние стороны которых будут уложены, зависит от шага обмотки. Затем укладываются катушки, которые своей правой стороной должны занимать нижние части, а левой — верхние части.

Последние катушки также укладываются обеими сторонами, только в верхние части пазов.

В результате такого размещения катушек обмотка будет иметь некоторую несимметрию, допустимую для малых электродвигателей.

Первые пять катушек (рис. 86) расположены обеими сторонами в нижнем слое обмотки, а последние пять катушек (начиная с 20-го паза) обеими сторонами расположены в верхнем слое обмотки.

Так как при таком способе укладки катушек легко подсчитать

шаг обмотки, такие обмотки часто называются обмотками с «открытым шагом».

Порядок укладки катушечных групп в статор электродвигателя при выполнении однослойной секционной обмотки «вразвалку» при нечетном q и разном шаге — см. на рис. 48.

Данные обмотки: $z=36$; $2p=4$; $q=3$; $y_1=7$; $y_2=8$.

Фаза состоит из четырех катушечных полугрупп — двух с двумя и двух с одной катушкой в полугруппе.

Первую катушечную полугруппу 1-й фазы левой стороной укладывают в 1-й и 2-й пазы, а правой — в 9-й и 10-й пазы по шагу, равному $y_2=8$.

Пропуская два паза по ходу намотки статора против часовой стрелки, укладывают катушечную полугруппу: катушку 3-й фазы левой стороной в 5-й, а правой — в 12-й пазы по шагу, равному $y_1=7$. Далее, пропуская один паз и укладывая катушечную полугруппу, состоящую из двух катушек 2-й фазы, левой стороной в 7-й и 8-й, а правой — в 15-й и 16-й пазы по шагу, равному $y_2=8$, снова пропускают два занятых правой стороной первой катушечной полугруппы 1-й фазы паза и укладывают катушечную полугруппу: катушку 1-й фазы — в 11-й и 18-й пазы по шагу, равному $y_1=7$. Пропуская еще один паз, занятый уже катушечной полугруппой — катушкой 3-й фазы, укладывают катушечную полугруппу, состоящую из двух катушек 3-й фазы, левой стороной в 13-й и 14-й, а правой — в 21-й и 22-й пазы.

Укладку остальных катушечных полугрупп производят в таком же порядке.

Началом фаз будут выводы, выходящие из 1-го, 7-го и 13-го пазов, расположенные через $2q$.

Соединив катушечные полугруппы в фазах по правилу «конец с концом, начало с началом», свободные выводы 29-го, 35-го и 5-го пазов, расположенные через $2q$, и будут концами 1-й, 2-й и 3-й фаз.

Рассматривая ряд схем обмоток, можно заметить, что при намотке статора против часовой стрелки катушечные группы разных фаз чередуются в такой последовательности:

в двухслойных обмотках

1 ф—3 ф—2 ф—1 ф—3 ф—2 ф—1 ф—3 ф—2 ф и т. д;

в однослойных секционных обмотках «вразвалку» (катушечные полугруппы)

1 ф—3 ф—2 ф—1 ф—3 ф—2 ф—1 ф—3 ф—2 ф и т. д;

в однослойных секционных обмотках

1 ф—2 ф—3 ф—1 ф—2 ф—3 ф—1 ф—2 ф—3 ф и т. д.

Б. ОДНОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

1. Требуется намотать однослойную секционную обмотку «вразвалку» однофазного электродвигателя с пусковым элементом (рис. 87).

Данные обмотки: $z=36$; $2p=4$; $q_A=6$; $q_B=3$; $y_A=6$; $y_{1B}=7$; $y_{2B}=8$.

Рабочая обмотка состоит из четырех катушечных полугрупп, а каждая полугруппа — из трех катушек. Пусковая обмотка состоит

также из четырех катушечных полугрупп, из которых две полугруппы имеют по две катушки, а две — по одной.

Статор поступает на намотку с уложенной пазовой изоляцией. Намотку начинают с укладки в статор рабочей обмотки, после чего укладывается пусковая обмотка, лобовые части которой для удобства ремонта располагаются над лобовыми соединениями рабочей обмотки.

Первую катушечную полугруппу рабочей обмотки укладывают левой стороной в 1-й, 2-й и 3-й пазы, а правой стороной — в 7-й, 8-й

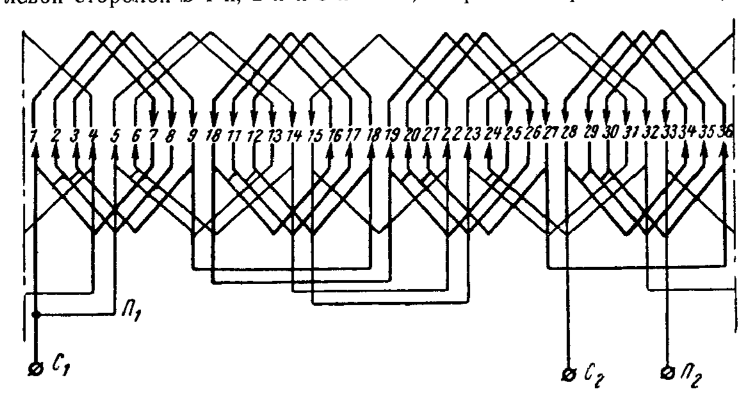


Рис. 87. Схема однослойной секционной обмотки «вразвалку» однофазного электродвигателя с пусковым элементом.

$z=36$; $2p=4$; $q_A=6$; $q_B=3$; $y_A=6$; $y_{1B}=7$; $y_{2B}=8$.

и 9-й пазы, вторую катушечную полугруппу укладывают левой стороной в 10-й, 11-й и 12-й пазы, а правой — в 16-й, 17-й и 18-й пазы.

Третья и четвертая катушечные полугруппы укладываются левыми сторонами в 19-й, 20-й, 21-й и 28-й, 29-й, 30-й пазы, а правыми — в 25-й, 26-й, 27 и 34-й, 35-й, 36-й пазы. Вывод, выходящий из 28-го паза, является концом рабочей обмотки.

Если все четыре катушечные полугруппы изготовлены из целого куска провода, что требуется при способе намотки статора без пайки схемы, то все четные катушечные полугруппы перед укладкой в соответствующие пазы разворачиваются на 180° для осуществления требуемого в этих обмотках соединения полугрупп «конец с концом, начало с началом».

Начало пусковой обмотки должно находиться от начала рабочей обмотки на расстоянии 90 *эл. град.* Здесь (рис. 87) одно пазовое деление («один паз») составляет $(360 \cdot p) : z = (360 \cdot 2) : 36 = 20$ *эл. град*, а расстояние между началами рабочей и пусковой обмоток равно четырем пазовым делениям. Следовательно, начала рабочей и пусковой обмоток расположены на расстоянии $4 \cdot 20 = 80$ *эл. град*, что, исходя из конструктивных особенностей обмотки, допускается.

Первую катушечную полугруппу пусковой обмотки укладывают левой стороной в 5-й и 6-й пазы, а правой — в 13-й и 14-й пазы;

вторую катушечную полугруппу, состоящую из одной катушки, укладывают в 15-й и 22-й пазы, развернув ее перед укладкой на 180°.

Третья и четвертая катушечные полугруппы укладываются аналогично левыми сторонами в 23-й, 24-й и 33-й пазы, а правыми — в 31-й, 32-й и 4-й пазы. Вывод, выходящий из 33-го паза, является концом пусковой обмотки.

По мере укладки катушек рабочей и пусковой обмоток ставят в пазы статора подклиновые прокладки и забивают изоляционные клинья.

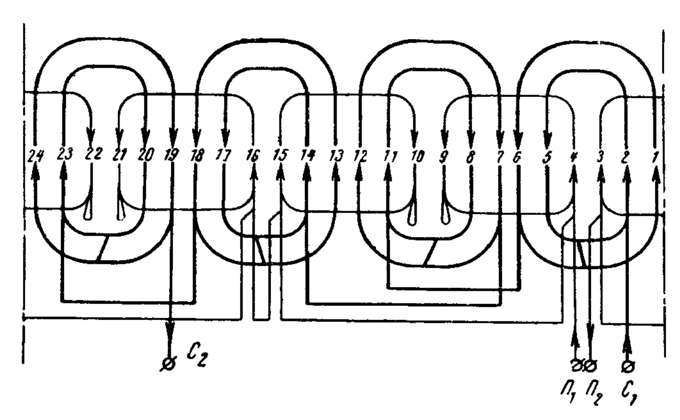


Рис. 88. Схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки «вразвалку» однофазного электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением (укладка по часовой стрелке, начало пусковой обмотки с «основной» секции).

$z=24$; $2p=4$; $q_A=4$; $q_B=2$; $y_{1A}=3$; $y_{2A}=5$; $y_B=5$.

В лобовых частях ставят междуфазные прокладки и отгибают лобовые части, придавая им соответствующую форму вручную или под прессом с использованием обжимок.

После присоединения к началам и концам обмотки выводов с обозначениями C_1, C_2 и $П_1$, $П_2$ (путем электросварки или пайки припоем ПОС-40) и изолирования мест пайки лобовые части обмотки бандажируются (скрепляются) миткалевой (тафтяной) лентой, шнур-чулком или шпагатом.

После проверки на пробой и витковое замыкание статор направляется на пропитку и сушку.

2. Требуется намотать однослойную катушечную (концентрическую) обмотку «вразвалку» однофазного электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением (рис. 88).

Данные обмотки: $z=24$; $2p=4$; $q_A=4$; $q_B=2$; $y_{1A}=3$; $y_{2A}=5$; $y_B=5$.

Рассматривая схему обмотки, приведенную на рис. 88, заметим, что нумерация пазов и укладка обмотки произведены справа налево, т. е. «по часовой стрелке», если смотреть со стороны схемы. Многие

обмотчики укладывают катушечные группы или полугруппы, продвигаясь по расточке статора аналогично движению часовой стрелки. Отсюда появилось выражение «намотка по часовой стрелке» или «намотка против часовой стрелки».

При выполнении обмоток трехфазных электродвигателей не обращают внимания на порядок укладки обмотки, так как направление вращения на заводском щитке трехфазного электродвигателя не обозначается. При выполнении обмоток однофазных электродвигателей порядок намотки следует учитывать, иначе можно не получить заданного направления вращения электродвигателя.

Рабочая обмотка (рис. 88) состоит из четырех катушечных полугрупп, а катушечная полугруппа — из двух катушек.

Первую катушку 1-й катушечной полугруппы укладывают во 2-й и 5-й пазы, а вторую — в 1-й и 6-й пазы; первую катушку 2-й катушечной полугруппы укладывают в 8-й и 11-й пазы, а вторую — в 7-й и 12-й пазы. При выполнении обмотки без пайки схемы вторую катушечную полугруппу перед укладкой в пазы разворачивают на 180° для получения соответствующего соединения катушечных полугрупп.

Третья и четвертая катушечные полугруппы укладываются в соответствующие пазы по шагу обмотки аналогично укладке первой и второй катушечных полугрупп. Вывод из 19-го паза является концом рабочей обмотки.

Начало пусковой обмотки выходит из 4-го паза (90 *эл. град* от начала рабочей обмотки, так как началом здесь считается 1-й паз).

Пусковая обмотка состоит из четырех катушечных полугрупп, а катушечная полугруппа — из одной катушки.

Каждая катушка пусковой обмотки состоит из двух секций — одной с бо́льшим числом витков и одной с меньшим числом витков. Для образования бифилярной катушки одна из секций (вторая по ходу намотки их на шаблоне) перед укладкой разворачивается на 180°. Если каждая катушка пусковой обмотки начинается с секции, имеющей большее число витков, то после разворачивания на 180° секции с меньшим числом витков направление тока в эффективных витках катушки будет соответствовать направлению тока в выводе, являющемся началом обмотки (рис. 88). В противном случае направление тока в выводе, обозначающем начало обмотки, и катушке, из которой выходит вывод, будет противоположным (рис. 89). В связи с этим секции с бо́льшим числом витков иногда не совсем точно называют «основными» секциями, а секции с меньшим числом витков — «бифилярными» секциями.

Укладку катушек пусковой обмотки (см. рис. 88) производят следующим образом.

Предварительно разворачивают вторую секцию 1-й катушки на 180° и укладывают одновременно обе секции в 4-й и 9-й пазы, затем разворачивают вторую секцию 2-й катушки на 180° и укладывают обе секции в 10-й и 15-й пазы. Аналогично укладывают 3-ю катушку в 16-й и 21-й пазы, а 4-ю — в 22-й и 3-й пазы. Вывод из 3-го паза является концом пусковой обмотки. Из 9-го, 10-го, 21-го и 22-го пазов выходят петли, получившиеся в результате разворачивания секций для образования бифилярных катушек.

На петли, образованные бифилярными катушками, надевают линоксиновые трубки или шнур-чулок. Укладка междуфазной изоляции, формовка лобовых частей, присоединение выводов с обозначе-

ниями C_1, C_2, $П_1$, $П_2$ и бандажировка производятся обычным способом.

Электродвигатель с обмоткой, выполненной по рис. 88, будет иметь левое вращение, т. е. против часовой стрелки, а электродвигатель с обмоткой, выполненной по рис. 89, будет иметь правое вращение, т. е. по часовой стрелке. Разница в обмотках заключается в том, что пусковая обмотка рис. 89 начинается с секции, имеющей меньшее число витков, поэтому направление тока в эффективных

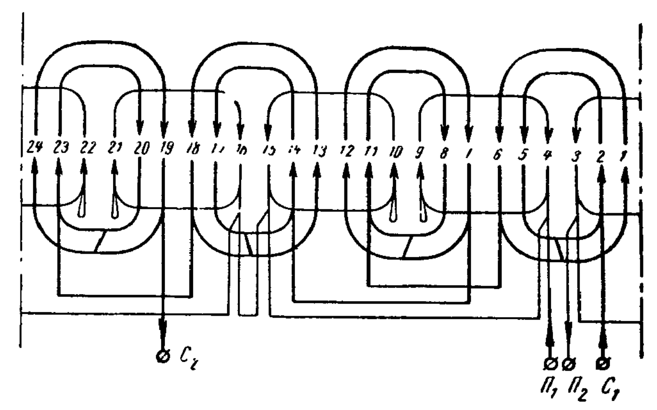


Рис. 89. Схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки «вразвалку» однофазного электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением (укладка по часовой стрелке, начало пусковой обмотки с «бифилярной» секции).

$z=24$; $2p=4$; $q_A=4$; $q_B=2$; $y_{1A}=3$; $y_{2A}=5$; $y_B=5$.

проводах 4-го паза будет обратным направлению тока в выводе, являющемся началом пусковой обмотки.

Если заметим на схеме обмотки направление тока в пазу, откуда выходит начало рабочей обмотки, то вращение электродвигателя будет всегда направлено в ту сторону, где расположены рядом лежащие пазы пусковой обмотки с обратным направлением тока в ее катушках. В обмотке по рис. 89 таким направлением будет от 2-го к 3-му пазу (по часовой стрелке), а в обмотке по рис. 88 — от 2-го к 22-му пазу (против часовой стрелки).

3. Требуется намотать однослойную катушечную (концентрическую) обмотку однофазного электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением.

Данные обмотки: $z=24$; $2p=2$; $q_A=8$; $q_B=4$; $y_{1A}=y_{1B}=9$; $y_{2A}=$ $=y_{2B}=11$. Число параллельных ветвей $a=2$ (рис. 90).

Катушечная «полугруппа» рабочей обмотки имеет катушек вдвое меньше, чем имела бы при том же числе пазов и полюсов катушечная полугруппа обмотки «вразвалку». Тем не менее, чтобы не вводить добавочного термина, оставим и для этой обмотки название «полугруппа».

Каждая параллельная ветвь рабочей обмотки состоит из двух катушечных полугрупп.

1-ю катушку 1-й полугруппы укладывают во 2-й и 11-й пазы, а 2-ю катушку — в 1-й и 12-й пазы. Вторую катушечную полугруппу размещают в 6-й и 15-й, 5-й и 16-й пазы. Вывод из 16-го паза является концом первой параллельной ветви.

Вторую параллельную ветвь рабочей обмотки составляют третья катушечная полугруппа, которую укладывают в 3-й и 18-й, 4-й и 17-й

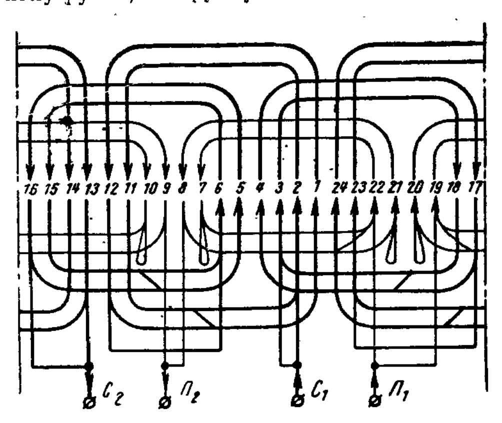


Рис. 90. Схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки однофазного электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением.

$z=24$; $2p=2$; $q_A=8$; $q_B=4$; $y_{1A}=y_{1B}=9$; $y_{2A}=$ $=y_{2B}=11$; $a=2$.

пазы, и четвертая катушечная полугруппа, которую размещают в 23-й и 14-й, 24-й и 13-й пазы. Вывод из 13-го паза является концом второй параллельной ветви.

Катушечные полугруппы в каждой параллельной ветви соединены «конец с началом».

Пусковая обмотка является обычной обмоткой «вразвалку»; в каждую параллельную ветвь входит одна катушечная полугруппа, состоящая из двух катушек. В каждой катушке имеются две секции, прячем в 1-й катушке сперва расположена секция с бо́льшим числом витков, затем — с меньшим числом витков, а во 2-й катушке, наоборот, сперва расположена секция с меньшим числом витков, а затем — с бо́льшим числом витков (см. рис. 80,*в*).

Укладка катушек пусковой обмотки в статор производится следующим образом. Развернув на 180° вторую секцию 1-й катушки 1-й катушечной полугруппы, укладывают обе секции в 22-й и 7-й пазы; далее разворачивают на 180° вторую секцию 2-й катушки 1-й катушечной полугруппы и укладывают обе секции в 21-й и 8-й пазы. Вывод из 8-го паза является концом первой параллельной ветви. Аналогично укладывают вторую катушечную полугруппу в 10-й и

19-й, 9-й и 20-й пазы. Вывод из 9-го паза является концом второй параллельной ветви.

Петли бифилярных катушек выходят из 21-го, 7-го, 10-го и 20-го пазов.

По мере укладки катушек ставят подклиновые прокладки и забивают клинья.

Остальные технологические операции выполняются ранее изложенным способом.

4. Требуется намотать двухслойную обмотку однофазного конденсаторного двигателя.

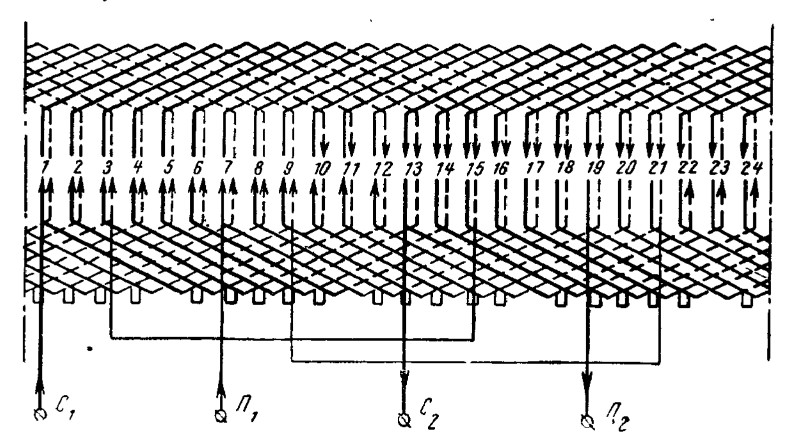


Рис. 91. Схема двухслойной обмотки однофазного конденсаторного двигателя.

$z=24$; $2p=2$; $q_A=q_B=6$; $y_A=y_B=9$.

Данные обмотки: $z=24$; $2p=2$; $q_A=q_B=6$; $y_A=y_B=9$ (рис. 91). Рабочая обмотка состоит из двух катушечных групп, а каждая группа имеет по шесть катушек.

Пусковая обмотка состоит также из двух катушечных групп, а каждая группа — из шести катушек.

Укладку обмотки выполняют следующим образом. Сперва укладывают первую катушечную группу рабочей обмотки левой стороной в 1-й, 2-й, 3-й, 4-й, 5-й и 6-й пазы, а правой стороной — в 10-й, 11-й, 12-й, 13-й, 14-й и 15-й пазы. Затем укладывают первую катушечную группу пусковой обмотки левой стороной в 7-й, 8-й, 9-й, 10-й, 11-й и 12-й пазы, а правой стороной — в 16-й, 17-й, 18-й, 19-й, 20-й и 21-й пазы. Далее разворачивают вторую катушечную группу рабочей обмотки на 180° и укладывают левой стороной в 13-й, 14-й, 15-й, 16-й, 17-й и 18-й пазы, а правой стороной — в 22-й, 23-й, 24-й, 1-й, 2-й и 3-й пазы. Вывод из 13-го паза является концом рабочей обмотки.

Начало пусковой обмотки должно выходить из 7-го паза, так как один паз соответствует 15 *эл. град* $[(360\cdot p):z]=[(360\cdot 1):24]=15$, а $6\cdot 15=90$ *эл. град.*

Вторую катушечную группу пусковой обмотки разворачивают на 180° и укладывают левой стороной в 19-й, 20-й, 21-й, 22-й, 23-й и 24-й пазы, а правой стороной — в 4-й, 5-й, 6-й, 7-й, 8-й и 9-й пазы. Вывод из 19-го паза является концом пусковой обмотки.

Остальные технологические операции выполняются в обычном для двухслойных обмоток порядке.

Если катушечные группы или полугруппы подготовлены раздельно, то от этого порядок их укладки в статор не меняется, а сборка схемы производится так, чтобы получились показанные на схеме обмотки соединения.

39. ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ БЕЗ ПАЕК СХЕМЫ

При намотке статора электродвигателя самой сложной и квалифицированной операцией является сборка схемы, особенно при наличии большого количества катушечных групп в фазах. После укладки катушечных групп в лобовой части обмотки со стороны схемы получается много начал и концов катушечных групп разных фаз, что усложняет соединение схемы, особенно для начинающих обмотчиков. Кроме того, после соединения схемы наступает кропотливая работа по сварке мест соединений и изолировка их.

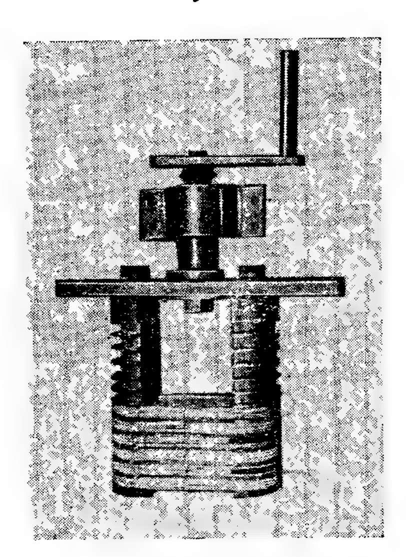


Рис. 92. Шаблон для намотки катушек (секций).

При выполнении обмоток алюминиевым проводом процесс пайки (или сварки) схемы особенно трудоемок и для этой работы требуются обмотчики высокой квалификации.

Для уменьшения трудоемкости по соединению схемы, экономии материалов и электроэнергии на Винницком электротехническом заводе внедрен и на протяжении многих лет применяется способ выполнения обмотки статора без паек схемы. Применяя этот способ, все обмотчики, включая и молодых, легко и быстро выполняют намотку статора без пайки схемы.

Для работы этим методом следует на всю фазу готовить катушки комплектно, без разрыва провода, на раздвижном шаблоне, головки которого имеют 12—18 канавок для размещения в них катушек в процессе намотки фазы. Для малых электродвигателей головки раздвижного шаблона имеют 12 канавок, а для средних и крупных — 18 канавок.

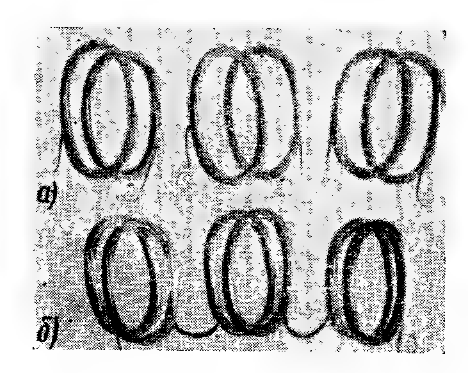


Рис. 93.

а — катушечные группы фазы однослойной секционной обмотки, выполняемой с пайкой схемы; *б* — фаза однослойной секционной обмотки, выполняемой без паек схемы.

На рис. 92 показан шаблон с ручным приводом. Головки шаблона имеют 12 канавок, позволяющих одновременно изготовлять 12 катушек. На шаблоне намотано только шесть катушек, которые разделены кусочками линоксиновой трубки на три катушечные группы, каждая из которых состоит из двух катушек. Намотчица катушек, начиная намотку фазы обмотки, заранее готовит столько кусочков линоксиновой трубки на фазу, сколько имеется в ней катушечных групп минус единица. Длина заготовок линоксиновой трубки зависит от диаметра статора, шага и вида обмотки. По мере намотки катушечной группы намотчица пропускает на свое место изоляционную трубку, а остальные придерживает надетыми на провод до перехода на следующую катушечную группу. На рис. 92 линоксиновые трубки находятся на переходах между 2-й и 3-й и между 4-й и 5-й катушками.

На рис. 93,*б* показана фаза, подготовленная для выполнения обмотки без паек схемы, которая состоит из трех катушечных групп (в каждой группе две катушки), между которыми в процессе намотки катушек помещаются линоксиновые трубки.

На рис. 93,*а* показана фаза для такой же обмотки, но с пайкой схемы. Каждая из трех катушечных групп имеет два вывода, а всего на фазу — шесть выводов.

Выполнение обмоток без пайки схемы не усложняет процессов укладки катушечных групп в статор, так как порядок намотки остается тем же, что и при выполнении обмотки с пайкой схемы.

На рис. 94 показан статор электродвигателя типа АО51-6 мощностью 2,8 *квт*, 1 000 *об/мин* в процессе вы-

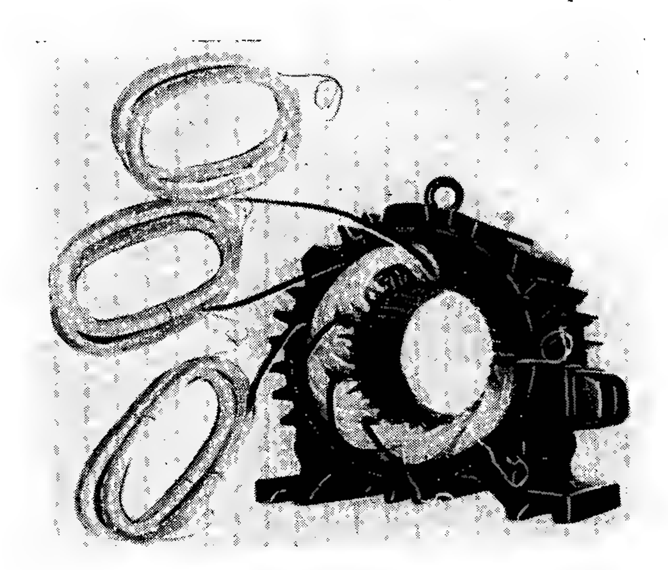


Рис. 94. Статор электродвигателя типа АО51-6 мощностью 2,8 *квт* в процессе выполнения обмотки без паек схемы.

полнения обмотки без пайки схемы. Данные обмотки следующие: $z=36$; $2p=6$; $q=2$; $y=1—7$.

В статор вложено по две катушечные группы каждой фазы; остальные расположены в определенном порядке на рабочем месте обмотчика. Вывод 1-й фазы находится первым слева, следующим расположен вывод 3-й фазы, за ним — вывод 2-й фазы.

Укладка катушечных групп данного электродвигателя производится следующим образом.

1-ю катушку 1-й фазы левой стороной укладывают в любой паз, приняв его за 1-й, 2-ю катушку первой катушечной группы 1-й фазы укладывают во 2-й по часовой стрелке. Порядок намотки по или против часовой

стрелки зависит от привычки обмотчика. Правые стороны катушек первой катушечной группы 1-й фазы укладывают в пазы по шагу обмотки.

Пропуская два паза (т. е. q пазов), укладывают 1-ю катушку 3-й фазы левой стороной (с выводом) в 5-й паз, 2-ю катушку этой катушечной группы — левой стороной в 6-й паз, а правые стороны — в пазы по шагу обмотки. Так как $2q=2\cdot2=4$, вывод из 5-го паза будет началом 3-й фазы.

Пропуская снова два паза, укладывают 1-ю катушку 2-й фазы левой стороной (с выводом) в 9-й паз, 2-ю катушку этой катушечной группы левой стороной в 10-й паз, а правые стороны — в пазы по шагу обмотки. Вывод из 9-го паза будет началом 2-й фазы ($5+2q=5+$ $+2\cdot2=9$).

Пропуская еще два паза, укладывают левые стороны второй катушечной группы 1-й фазы, а правые стороны — по шагу обмотки.

Необходимо заметить, что здесь незанятыми оказались только два паза при укладке первой катушечной группы 3-й фазы, а в дальнейшем те пазы, которые следовало пропускать, уже были заняты правыми сторонами соответствующих катушечных групп. Поэтому, начиная с первой катушечной группы 2-й фазы, укладывались левые стороны катушечных групп в свободные два паза по ходу расточки статора (по часовой стрелке), что значительно облегчает выполнение обмотки.

Далее укладывают в такой же последовательности вторую катушечную группу 3-й фазы, вторую 2-й фазы, третью 1-й фазы, третью 3-й фазы и третью катушечную группу 2-й фазы. Выводы последних катушек будут концами фаз.

Выполнение остальных технологических операций производится в такой же последовательности, как и при выполнении обмотки с пайкой схемы.

Порядок выполнения обмоток без пайки схемы показан на рис. 95, где приведена схема однослойной секционой обмотки электродвигателя со следующими данными: $z=18$; $2p=6$; $q=1$; $y=3$.

Фаза состоит из трех катушечных групп с одной катушкой в катушечной группе.

Укладку катушек этой и последующих обмоток про-

изводят, двигаясь по расточке статора против часовой стрелки.

Первую катушечную группу (катушку) 1-й фазы левой стороной укладывают в 1-й паз, а правой — согласно шагу, т. е. в 4-й паз.

Пропуская один паз ($q=1$), укладывают 1-ю катушку 2-й фазы левой стороной в 3-й паз, а правой — по шагу.

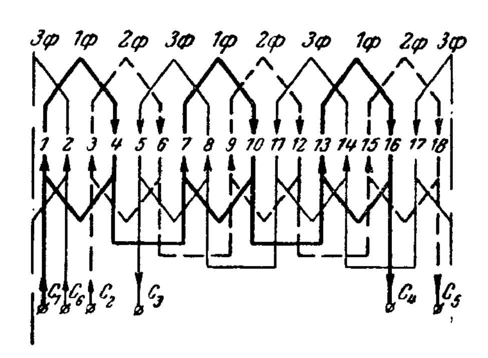


Рис. 95. Схема однослойной секционной обмотки.
$z=18$; $2p=6$; $q=1$; $y=3$.

1-ю катушку 3-й фазы левой стороной укладывают в 5-й паз, а правой — по шагу обмотки.

Дальше катушки укладывают, чередуя фазы: 2-я катушка 1-й фазы, 2-я катушка 2-й фазы, 2-я катушка 3-й фазы, 3-я катушка 1-й фазы, 3-я катушка 2-й фазы, 3-я катушка 3-й фазы.

Выводы с первых катушек будут началами фаз, выводы с последних катушек — концами их.

Рассмотрим выполнение однослойной секционной обмотки «вразвалку» (рис. 85). Данные обмотки: $z=24$; $2p=2$; $q=4$; $y=10$.

При выполнении однослойных секционных обмоток «вразвалку» следует учитывать, что катушечные полугруппы в обмотке чередуются в последовательности: 1-я фаза, 3-я фаза, 2-я фаза, 1-я фаза, 3-я фаза, 2-я фаза и т. д. (при укладке их против часовой стрелки).

Катушечные полугруппы в фазе соединяются «конец с концом, начало с началом».

Намотку данного электродвигателя производят в таком порядке.

Первую катушечную полугруппу 1-й фазы левой стороной укладывают в 1-й и 2-й пазы, а правой — по шагу обмотки. Вывод первой катушки будет началом 1-й фазы.

Пропуская $q/2$ пазов, т. е. два паза, левой стороной укладывают первую катушечную полугруппу 3-й фазы в 5-й и 6-й пазы, а правой — по шагу обмотки. Вывод 1-й катушки будет концом 3-й фазы.

Пропуская еще два паза, укладывают левой стороной первую катушечную полугруппу 2-й фазы в 9-й и 10-й пазы, а правой — по шагу обмотки.

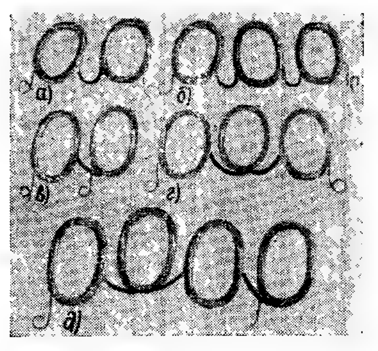


Рис. 96. Расположение катушечных групп (полугрупп) при укладке фазы обмотки (без пайки схемы) в статор.

Следующие два паза, которые следовало пропустить, оказались занятыми правой стороной первой катушечной полугруппы 1-й фазы, поэтому вторая катушечная полугруппа 1-й фазы расположится рядом с первой катушечной полугруппой этой же фазы.

Но укладывать вторую катушечную полугруппу 1-й фазы так, как укладывали вторую катушечную полугруппу 1-й или любой фазы в однослойных секционных обмотках (рис. 96,*а* и *б*), нельзя; для получения соединения «конец с концом», «начало с началом» следует вторую катушечную полугруппу перед укладыванием повернуть на 180°, так чтобы правая сторона ее (с выводом) стала левой стороной, а левая сторона — правой (рис. 96,*в*). Вывод из второй катушечной полугруппы будет концом 1-й фазы.

Аналогично укладывают вторую катушечную полугруппу 3-й фазы, вывод из которой будет началом 3-й фазы, и укладывают вторую катушечную полугруппу 2-й фазы, развернув ее также на 180°, вывод из которой будет концом 2-й фазы.

На рис. 97 дана схема двухслойной обмотки.

Данные обмотки: $z=24$; $2p=2$; $q=4$; $y=8$.

Фаза состоит из двух катушечных групп, а катушечная группа — из четырех катушек.

В двухслойных обмотках катушечные группы чередуются (при укладке их против часовой стрелки) в такой последовательности: 1-я фаза, 3-я фаза, 2-я фаза, 1-я фаза, 3-я фаза, 2-я фаза и т. д., а соединение их в фазе выполняется по правилу «конец с концом, начало с началом».

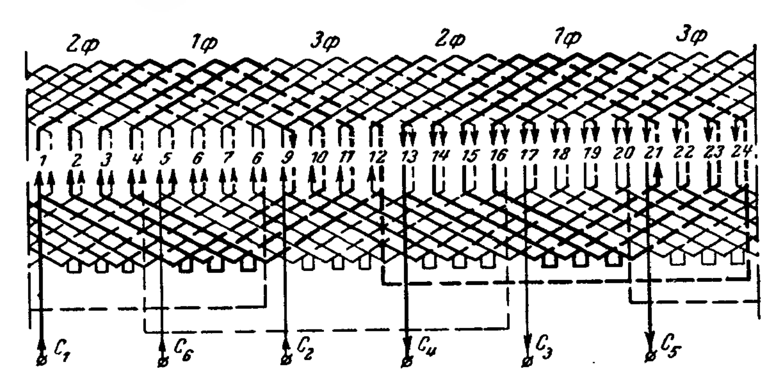


Рис. 97. Схема двухслойной обмотки.
$z=24$; $2p=2$; $q=4$; $y=8$.

Намотку данного электродвигателя производят следующим образом.

Первую катушечную группу 1-й фазы укладывают левой стороной в 1-й, 2-й, 3-й и 4-й пазы, а правой — по шагу обмотки. Вывод 1-й катушки будет началом 1-й фазы.

Первую катушечную группу 3-й фазы левой стороной укладывают в 5-й, 6-й, 7-й и 8-й пазы, а правой — по шагу обмотки. Вывод из 1-й катушки будет концом 3-й фазы.

Первую катушечную группу 2-й фазы левой стороной укладывают в 9-й, 10-й, 11-й и 12-й пазы, а правой — по шагу обмотки. Вывод из 1-й катушки будет началом 2-й фазы.

Вторую катушечную группу 1-й фазы разворачивают на 180°, так чтобы правая сторона ее стала левой, а левая — правой, и укладывают (левую сторону) в 13-й, 14-й, 15-й и 16-й пазы, а правую — по шагу обмотки

(в 21-й, 22-й, 23-й и 24-й пазы). Вывод из 13-го паза будет концом 1-й фазы.

Вторую катушечную группу 3-й фазы разворачивают на 180° и укладывают (левую сторону) в 17-й, 18-й, 19-й и 20-й пазы, а правую — по шагу обмотки (в 1-й, 2-й, 3-й и 4-й пазы). Вывод из 17-го паза будет началом 3-й фазы.

Вторую катушечную группу 2-й фазы разворачивают на 180° и укладывают (левую сторону) в 21-й, 22-й, 23-й

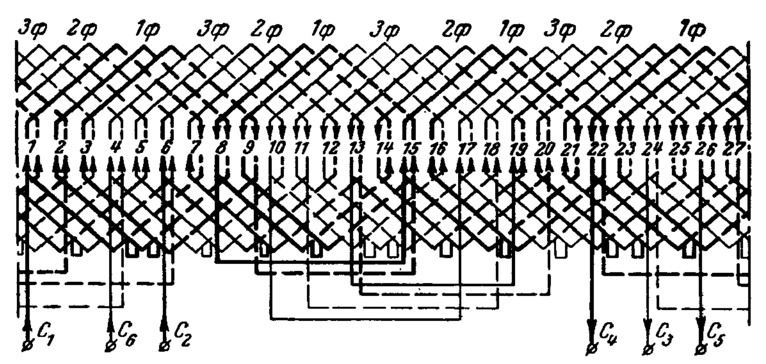


Рис. 98. Схема двухслойной обмотки (2-й вариант — без паек соединений катушечных групп).
$z=27$; $2p=4$; $q=2^1/_4$; $y=6$.

и 24-й пазы, а правую — по шагу обмотки (в 5-й, 6-й, 7-й и 8-й пазы). Вывод из 21-го паза будет концом 2-й фазы.

После укладки начала фаз должны выходить из 1-го, 9-го и 17-го пазов, а концы — из 13-го, 21-го и 5-го пазов с расстоянием между ними, равным $2q$.

Необходимо заметить, что обмотки без пайки схемы могут выполняться с «закрытым» и «открытым шагом», с симметричным и несимметричным размещением лобовых частей.

Рассмотрим теперь некоторые обмотки, выполненные без пайки схемы. На рис. 98 приведена схема двухслойной обмотки четырехполюсного электродвигателя с следующими данными: $z=27$; $2p=4$; $q=2^1/_4$; $y=6$.

На фазу приходятся одна катушечная группа с тремя катушками и три с двумя в группе.

Укладка катушечных групп произведена в следующем порядке: три катушки первой катушечной группы

1-й фазы левой стороной заняли верхнюю часть 1-го, 2-го и 3-го пазов, а правой — нижнюю часть 7-го, 8-го и 9-го пазов; две катушки первой катушечной группы 3-й фазы левой стороной заняли верхнюю часть 4-го и 5-го пазов, а правой — нижнюю часть 10-го и 11-го пазов; две катушки первой катушечной группы 2-й фазы левой стороной заняли верхнюю часть 6-го и 7-го пазов, а правой — нижнюю часть 12-го и 13-го пазов. Далее

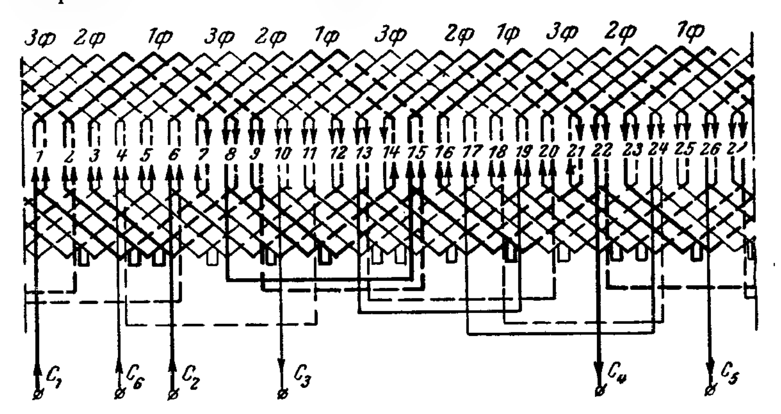


Рис. 99. Схема двухслойной обмотки (1-й вариант — с пайкой соединений катушечных групп).

$z=27$; $2p=4$; $q=2^1/_4$; $y=6$.

следуют: две катушки 1-й фазы, три катушки 3-й фазы, две катушки 2-й фазы, две катушки 1-й фазы, две катушки 3-й фазы, три катушки 2-й фазы, две катушки 1-й фазы, две катушки 3-й фазы, две катушки 2-й фазы.

Во всех фазах каждая 2-я и 4-я катушечные группы развернуты на 180° для получения соединения «конец с концом, начало с началом».

Начала фаз выходят из 1-го, 6-го и 24-го пазов, а концы — из 22-го, 26-го и 4-го пазов. Между началами 1-й и 2-й фаз — 5 пазов ($2q=4^1/_2$), а между началами 2-й и 3-й фаз — 18 пазов. Это соответствует $\frac{360p}{z}\cdot 18=\frac{360\cdot 2}{27}\cdot 18=480$ *эл. град.* Если от 480 вычтем 360 *эл. град,* получим 120 *эл. град,* следовательно, электрическая симметрия при построении обмотки выдержана, что видно по размещению полюсов на схеме. Концом 3-й фазы будет выводной конец, выходящий из 4-го па-

за, откуда начата была укладка 3-й фазы. Для сравнения на рис. 99 приведена обмотка такого же электродвигателя, но с пайкой схемы, которая в электрическом отношении ничем, кроме расположения начала 3-й фазы (паз 10), не отличается от обмотки, выполненой без пайки схемы.

На рис. 100 приведена двухслойная обмотка статора, выполненная без пайки схемы, у которой: $z=27$; $2p=6$; $q=1^1/_2$; $y=4$.

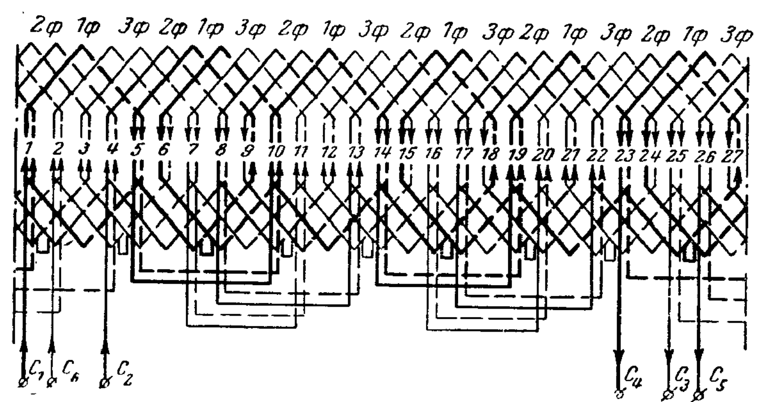


Рис. 100. Схема двухслойной обмотки.
$z=27$; $2p=6$; $q=1^1/_2$; $y=4$.

В данной схеме каждая фаза состоит из шести катушечных групп: трех односекционных и трех двухсекционных. Укладка катушечных групп каждой фазы производится по ранее указанной последовательности. Начало 3-й фазы выходит из 25-го паза, удаленного от начала 2-й фазы на расстояние 840 *эл. град*. Если от 840 отнять 2·360, то получим 120 *эл. град*. Таким образом, от перемещения начала 3-й фазы в обмотках без пайки схемы электрическая симметрия не нарушена.

На рис. 101 приведена схема двухслойной обмотки с такими же данными, как и обмотка на рис. 100, но с тремя параллельными ветвями. В каждую параллельную ветвь вошли одна группа из одной секции и одна группа из двух секций. При намотке таких катушек на каждую фазу готовят 3 компл., где в один комплект входят одна группа с одной секцией и одна из двух секций.

Таким образом, для выполнения обмоток без пайки схемы следует учитывать следующее.

В однослойных секционных обмотках катушечные группы независимо от количества их в фазе укладываются в статор в такой же последовательности, в какой производилась намотка катушек, в результате чего соединение катушечных групп получается «конец с началом» (см. рис. 96,*а* и *б*).

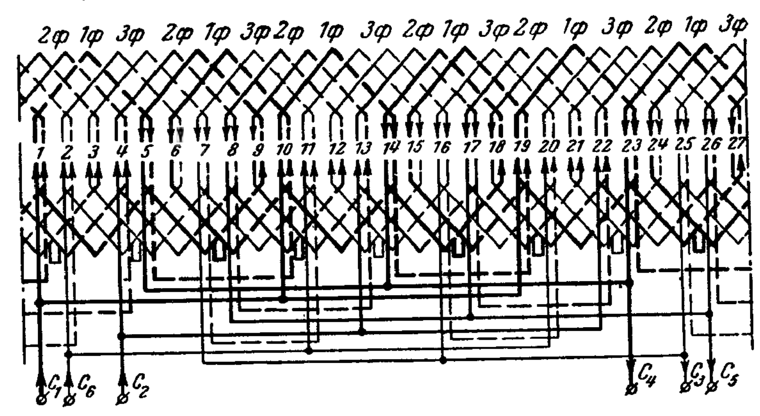


Рис. 101. Схема двухслойной обмотки.

$z=27$; $2p=6$; $q=1\frac{1}{2}$; $y=4$; $a=3$.

В однослойных секционных обмотках «вразвалку» каждые четные полугруппы в каждой фазе перед укладкой в статор разворачиваются на 180°; в результате соединение катушечных полугрупп получается «конец с концом, начало с началом» (рис. 96,*в* и *д*).

В двухслойных обмотках каждые вторые, четвертые и т. д., т. е. четные, группы разворачиваются перед укладкой в статор на 180°, в результате чего получается соединение «конец с концом, начало с началом» (рис. 96,*в*,*г* и *д*).

При выполнении обмоток с дробным q и величине дроби, равной $^1/_2$, намотка двух фаз должна быть начата с катушечных групп, имеющих b катушек, и одной фазы — с катушечными группами, имеющими $b+1$ катушек, или наоборот.

Во всех обмотках независимо от способа выполнения их (с пайкой или без пайки схемы) при изменении на-

правления укладки катушечных групп чередование групп или полугрупп разных фаз в обмотке изменится на обратное. Например, если в двухслойной обмотке чередование катушечных групп разных фаз против часовой стрелки было: 1-я фаза, 3-я фаза, 2-я фаза, 1-я фаза, 3-я фаза, 2-я фаза и т. д., то при изменении направления укладки катушечных групп на обратное, т. е. по часовой стрелке, чередование катушечных групп разных фаз будет: 1-я фаза, 2-я фаза, 3-я фаза, 1-я фаза, 2-я фаза, 3-я фаза.

Для того чтобы в обмотках с дробным числом пазов на полюс и фазу, дробь которого не равна $^1/_2$, симметрично чередовались катушечные группы с разным числом катушек, необходимо при намотке фаз для выполнения обмотки без пайки схемы руководствоваться схемой обмотки и катушечные группы размещать в фазах с разным числом катушек так, чтобы при выполнении обмотки обеспечить указанную выше симметрию. Например, при выполнении однослойной секционной обмотки статора электродвигателя на 600 *об/мин* при $z=36$ на фазу приходятся четыре односекционные и одна двухсекционная группы (см. приложение 10).

В обмотке группы из одной секции и двух секций должны быть расположены в определенной последовательности: 1—1—1—1—2—1—1—1—1—2—1—1—1—1—2. Для получения размещения катушечных групп в обмотке, намотанной против часовой стрелки, катушечные группы из одной и двух секций следует расположить в такой последовательности: 1-я фаза: 1—1—1—2—1; 2-я фаза: 1—2—1—1—1; 3-я фаза: 1—1—1—1—2.

Порядок намотки катушечных групп в фазах можно определить, и не имея схемы обмотки, следующим образом.

Определяют величину q. В приведенном примере

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{36}{3\cdot 10}=1\,\frac{1}{5}.$$

Для данного q определяют порядок чередования катушечных групп в обмотке (см. приложение 10), где чередование будет: 1—1—1—1—2, 1—1—1—1—2 и т. д.

При $z=36$ всех катушек будет 18, а на фазу — 6. Следовательно, на всю обмотку будет 15 катушечных групп.

Составляется таблица, где в верхней строке приводится чередование фаз, а в нижней — чередование катушечных групп в обмотке.

Чередование фаз при укладке обмотки против часовой стрелки	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Чередование катушечных групп в обмотке	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2

По верхней и нижней строкам выбирают порядок чередования групп из одной и двух секций отдельно для каждой фазы:

1-я фаза: 1—1—1—2—1; 2-я фаза: 1—2—1—1—1; 3-я фаза: 1—1—1—1—2.

При таком выполнении получится обмотка с симметричным расположением катушечных групп с разным числом катушек.

40. ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ОБМОТОК СТАТОРА МНОГОСКОРОСТНЫХ АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЕДИНОЙ СЕРИИ А И АО

Описание обмоток многоскоростных трехфазных электродвигателей приведено в гл. 6. В этом параграфе остановимся на некоторых особенностях выполнения обмоток многоскоростных электродвигателей применительно к конкретным типам двигателей.

1. Двухскоростной электродвигатель АО51-4/2

Статор имеет одну двухскоростную катушечную (концентрическую) обмотку (см. рис. 72). Каждая фаза обмотки состоит из двух катушечных групп. Для уменьшения длины лобовых частей обмотки катушечные группы разделены на полугруппы, состоящие из $q:2=$ $=6:2=3$ катушек.

При укладке в статор катушечные полугруппы располагаются в рядом лежащих пазах и, имея последовательное соединение, образуют катушку, левая и правая стороны которых занимают по q пазов.

Укладка катушек в статор производится следующим образом.

Первую катушечную полугруппу 1-й фазы укладывают левыми сторонами в нижние части 3-го, 2-го и 1-го пазов, а правыми — в нижние части 10-го, 11-го и 12-го

пазов; вторую катушечную полугруппу 1-й фазы укладывают левыми сторонами в нижние части 6-го, 5-го и 4-го пазов, а правыми — в нижние части 13-го, 14-го и 15-го пазов.

Первую катушечную полугруппу 3-й фазы укладывают левыми сторонами в нижние части 9-го, 8-го и 7-го пазов, а правыми — в нижние части 16-го, 17-го и 18-го пазов. Вторую катушечную полугруппу укладывают левыми сторонами в верхнюю часть 12-го, 11-го и 10-го пазов, а правыми — в нижние части 19-го, 20-го и 21-го пазов.

Последующие катушечные полугруппы (2-й, 3-й и 1-й фаз) укладываются в обычном для двухслойных обмоток порядке, т. е. при принятом в схеме порядке намотки «против часовой стрелки» левые стороны катушек размещаются в верхних частях пазов, а правые — в нижних частях пазов. Однако последние катушечные полугруппы (четвертая 3-й фазы, третья и четвертая 2-й фазы) укладываются обеими сторонами в верхних частях пазов.

По мере укладки катушек в нижние части пазов ставят междуслойные прокладки из электрокартона толщиной 0,2 *мм* в два слоя и лакоткани в один слой и одновременно стороны катушек временно закрепляют в пазах установленными с торцов короткими деревянными клиньями.

Перед укладкой последующих катушек в верхние части пазов клинья удаляют.

В лобовых частях между катушечными полугруппами ставят прокладки из электрокартона толщиной 0,2 *мм* в два слоя и лакоткани в один слой.

Укладка подклиновой изоляции, клиньев, сборка схемы, присоединение выводов и бандажировка лобовых частей обмотки выполняются, как и в обычных односкоростных электродвигателях.

Выполняя сборку схемы, следует тщательно следить за правильностью маркировки выводных концов согласно схеме обмотки.

2. Двухскоростной электродвигатель АО62-4/2

Статор имеет одну двухскоростную обмотку с теми же данными, что и электродвигатель АО51-4/2. Разница состоит лишь в том, что обмотка электродвигателя АО62-4/2 не катушечная (концентрическая), а секцион-

ная с одинаковым шагом (рис. 71). Каждая фаза состоит из двух катушечных групп, а катушечная группа — из шести катушек.

Укладка катушечных групп и последующие технологические операции ничем существенным не отличаются от технологии выполнения односкоростной двухслойной обмотки.

3. Двухскоростной электродвигатель АО51-6/4

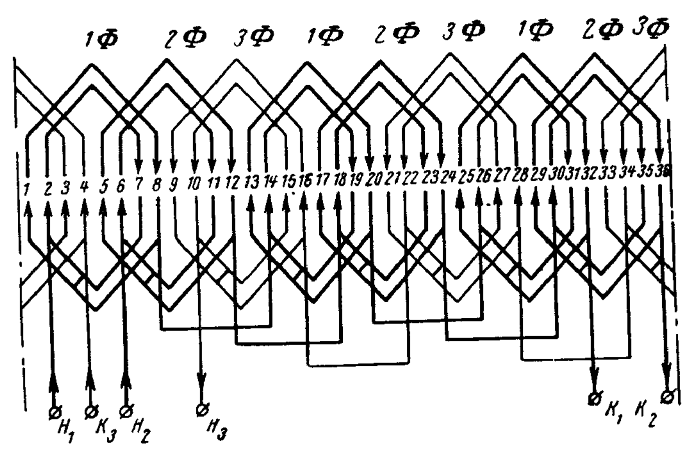


Рис. 102. Схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки многоскоростного электродвигателя.
$z=36$; $2p=6$; $y=1\div8$; 2—7.

Статор имеет две самостоятельные обмотки. Одна обмотка выполняется на шесть полюсов по схеме рис. 102, а вторая — на четыре полюса по схеме рис. 45. Обе обмотки являются однослойными катушечными (концентрическими).

В статор сперва укладывают обмотку на четыре полюса, а затем на шесть полюсов, т. е. первой укладывается обмотка с бо́льшим числом катушек в катушечной группе (с бо́льшим q). Между сторонами катушек обеих обмоток в пазу прокладывается междуслойная изоляция из двух слоев электрокартона толщиной 0,2 *мм* и одного слоя лакоткани или из двух слоев пленкокартона толщиной 0,3 *мм*. Остальные технологические операции являются общими для всех однослойных катушечных (концентрических) обмоток.

4. Трехскоростной электродвигатель А61-8/6/4

Статор имет две двухслойные обмотки: одну — двухскоростную на восемь и четыре полюса (см. рис. 73), другую — односкоростную на шесть полюсов. Сначала укладывают в статор двухскоростную обмотку, затем односкоростную. В пазах между катушками обеих обмоток ставят междуслойные прокладки из двух слоев электрокартона толщиной 0,2 *мм* и одного слоя лакоткани или из двух слоев пленкокартона толщиной 0,3 *мм*.

В каждой обмотке между верхней и нижней катушками также ставят в пазу изоляционные прокладки из двух слоев электрокартона толщиной 0,2 *мм* и одного слоя лакоткани.

В двухскоростной обмотке (см. рис. 73) катушечные группы в фазах соединяются попарно через одну (например, в 1-й фазе: 1-я с 7-й, 4-я с 10-й).

В каждой паре катушечных групп должна быть одна группа с пятью катушками и одна с четырьмя. Поэтому при укладке катушечных групп следует строго руководствоваться схемой обмотки.

Укладка катушек и выполнение остальных технологических операций производятся в полном соответствии с технологией выполнения двухслойных обмоток.

5. Четырехскоростной электродвигатель А61-12/8/6/4

В статоре расположены две двухслойные двухскоростные обмотки: одна на 8/4 полюса (рис. 73), другая на 12/6 полюсов (рис. 74).

Первой укладывается в статор двухскоростная обмотка на 8/4 полюса, затем укладывается двухскоростная обмотка на 12/6 полюсов.

Каждая фаза обмотки на 12/6 полюсов состоит из шести катушечных групп, в каждой группе по три катушки. Соединяются между собой последовательно три катушечные группы, расположенные через одну (например, в 1-й фазе: 1-я, 7-я и 13-я; 4-я, 10-я и 16-я). Здесь, как и во всех других двухскоростных обмотках, особое внимание следует обращать на правильное соединение схемы и правильную маркировку выводных концов.

41. ВЫПОЛНЕНИЕ ОБМОТКИ РОТОРА

До размотки ротора со стержневой волновой обмоткой необходимо подсчитать количество пазов в сердечнике ротора, а по шагу обмотки определить число по-

люсов электродвигателя. Кроме того, определяют количество витков и замков в бандаже, расположение и количество бандажей, диаметр бандажной проволоки и т. п.

В процессе размотки ротора помечают паз, из которого выходит любой из выводов, идущий к контактным кольцам; считая этот паз первым, фиксируют, в какую сторону произведен выгиб лобовых частей (в правую или левую) стержня, принятого за первый, нумеруют пазы, а также отмечают пазы, из которых выходят стержни, идущие к контактным кольцам, стержни, соединяемые перемычками и соединяемые в звезду. При необходимости снимают схему обмотки.

В процессе размотки уточняются и марка материалов, способ изоляции пазов между катушечными группами, между нижним и верхним слоями обмотки и т. п. Кроме того, изготовляется шаблон по форме стержней нижнего и верхнего слоев.

После снятия проволочных бандажей, распайки соединительных хомутиков верхние стержни в лобовой части выравнивают с одной стороны и вынимают из пазов, нумеруя их по порядку, считая первым стержнем тот, который вынут из 1-го паза. Таким же путем выравниваются и вынимаются нижние стержни, где за первый стержень принимается тот, который вынут из 1-го паза.

Необходимо иметь в виду, что верхние стержни немного длиннее нижних, поэтому их следует складывать отдельно.

Стержни после выемки очищаются от старой изоляции, выравниваются и рихтуются. Подгорелые стержни с частичным подгаром заменяются новыми. Концы стержней зачищаются стальной щеткой или на наждачном станке и лудятся. В некоторых случаях стержни для удаления старой изоляции обжигаются.

Изолировка стержней и перемычек при изоляции класса А производится хлопчатобумажной лентой (тафтяной) в два слоя, а концы ленты приклеиваются бакелитовым лаком.

После изолировки стержни с одной стороны загибают, придавая им форму полукатушек соответственно шаблону.

Одновременно с подготовкой стержней производится и очистка ротора от старой изоляции, удаляются заусенцы, рихтуются пазы и после продуваются сжатым воз-

духом. Изолировка пазов выполняется следующим образом.

Изготовляется деревянная оправка по форме паза, на нее наматывается электрокартон толщиной 0,2 *мм*, а между слоями электрокартона наматывается лакоткань, в результате чего получается гильза из трех слоев: два слоя электрокартона, а между ними слой лакоткани.

Перед намоткой ротора нажимные шайбы изолируются пропитанным электрокартоном толщиной 0,5—1 *мм*, который предварительно нарезают полосками. Полоски наклеиваются на шайбы клеящим лаком и закрепляются хлопчатобумажной лентой. Изоляция нажимных шайб должна плотно подходить к гильзе, чтобы при бандажировке лобовых частей ротора изоляция паза не нарушалась. В электродвигателях с незначительной толщиной нажимных шайб к торцам сердечника ротора прикрепляют изолировочные шайбы из электрокартона.

После изолировки пазов и нажимных шайб производится укладка стержней. Последовательность укладки может быть разной для роторов электродвигателей высокого и низкого напряжения, с изоляцией класса А, другого класса изоляции и т. п.

Способ выполнения обмотки ротора электродвигателя напряжением до 500 в при применении изоляции класса А.

Последовательность укладки стержней и последующих технологических операций выполнения обмотки ротора можно принять следующую.

Со стороны контактных колец в пазы укладываются (передняя сторона) перемычки по схеме.

Со стороны контактных колец укладываются нижние стержни, а на их лобовые части накладываются электрокартонная прокладка и временный бандаж из стальной проволоки или тафтяной ленты.

При помощи специальных ключей (рис. 103) со стороны привода загибаются нижние стержни в сторону и по форме согласно шаблону, а концы перемычек загибаются по форме лобовой части нижних стержней. Правильное расположение стержням придают по окружности лобовой части. Между катушечными группами кладут изоляционные прокладки из электрокартона и лакоткани и бандажом из киперной ленты укрепляют

лобовую часть. Затем поверх бандажа накладывают изоляционные прокладки из электрокартона и лакоткани и лобовую часть укрепляют киперной лентой.

Снимают временный бандаж с лобовой части со стороны контактных колец и накладывают бандаж из киперной ленты, изолируют и крепят лобовую часть так, как и со стороны привода.



Рис. 103. Ключи для загибки стержней обмотки ротора.

В пазы кладут прокладки из электрокартона для изоляции нижних стержней от верхних.

Со стороны контактных колец укладывают верхние стержни и соединяют их с нижними стержнями через медные луженые скобочки (хомутики) в соответствии со схемой.

Производят загибку верхних стержней со стороны привода и соединяют их с нижними стержнями.

Прокладывают изоляционные прокладки между катушечными группами верхнего слоя обмотки.

Расклинивают стержни в хомутиках медными лужеными клиньями и производят пайку мягкими или твердыми припоями.

Соединяют концы фаз (временно) в звезду и проверяют правильность схемы и на отсутствие витковых замыканий.

Проверяют обмотку ротора на электрическую прочность изоляции между фазами и между фазами и корпусом.

Производят пайку кольцевой шины, соединяющей обмотку в звезду.

Подводят начала фаз к контактным кольцам и соединяют их пайкой. Проверяют качество пайки, пропустив по обмотке ротора ток, превышающий рабочий ток ротора на 10—15%. В местах недоброкачественной пайки будет чрезмерный нагрев обмотки.

Накладывают на лобовые части бандаж согласно снятым данным при размотке ротора.

Производят балансировку ротора.

После проведенных операций ротор направляется для пропитки и сушки.

42. ПРОПИТКА И СУШКА ОБМОТОК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Всякая изоляция обладает способностью впитывать в себя влагу, что снижает ее изоляционные свойства. Поэтому после частичного ремонта или перемотки статора (фазного ротора) необходимо обмотку высушить и пропитать изоляционными лаками, так как при сушке происходит удаление впитанной изоляцией влаги, а при пропитке — заполнение пустот и пор изоляции изоляционными пропиточными лаками.

Наиболее распространенным способом является сушка обмотки статора и ротора в печи горячим воздухом, подогреваемым паровыми или электрическими калориферами. Во время сушки должны быть обеспечены циркуляция горячего воздуха и удаление водяных паров и паров растворителей путем регулирования открытия заслонок в печи и вентиляционной системы.

Температура сушки обычно равна 110—115° С при продолжительности сушки 4—10 *ч*, а температура вынутого из печи статора (ротора) после сушки и перед пропиткой 60—80° С.

Продолжительность высыхания пропитанных обмоток зависит от начальной температуры и тепловой мощности сушильной печи, скорости циркуляции воздуха в печи, габаритов электродвигателей, степени загрузки печи и пр.

Приведенное ниже время сушки при пропитке обмоток некоторыми лаками ориентировочное и взято из практики ряда ремонтных заводов, поэтому оно должно корректироваться, исходя из местных условий.

До пропитки обмоток необходимо проверить вязкость лака вискозиметром Энглера, вискозиметром (воронки) НИИЛК или вискозиметром ВЗ-4.

Наиболее распространенный вискозиметр ВЗ-4 имеет объем воронки 100 *см*^{3}, диаметр сопла 4 *мм* и высоту сопла 4 *мм*. Воронка заливается лаком с температурой 20° С до краев. Вязкость испытываемого лака определяется временем истечения его через сопло в секундах.

Вязкость по воронке НИИЛК также определяется временем истечения 100 *см*^{3} лака в мерный сосуд через сопло диаметром 7 *мм*.

Вязкость, замеренная по вискозиметру Энглера, выражается в градусах Энглера; числовая величина вязкости является частным от деления времени истечения 200 *см*^{3} лака или эмали через сопло вискозиметра на время истечения через то же сопло 200 *см*^{3} дистиллированной воды. Последняя величина дается как постоянная прибора и обычно равна 50—52 *сек*.

Рекомендуемые вязкости лаков по вискозиметру ВЗ-4 при 20° С: № 458 и 447 20—36 *сек*, № 460 25—36 *сек*, БТ-99 30—60 *сек*, ГФ-95 30—50 *сек*, МЛ-92 — не менее 25 *сек* и т. д.

Величина вязкости по воронке НИИЛК примерно равна $^1/_4$ величины вязкости, измеренной вискозиметром ВЗ-4.

При вязкости, превышающей рекомендуемую для данной марки лака, в бак добавляется разбавитель, придерживаясь следующих требований.

Температура разбавителя должна быть примерно равна температуре лака.

Разбавитель следует вливать небольшими порциями и тщательно перемешивать с лаком деревянной палкой по всей глубине бака.

Если применяется смесь разбавителей, то необходимо разбавители предварительно смешать и только после этого состав смеси вливать малыми порциями в бак при постоянном перемешивании.

При переливании растворителей металлическую посуду необходимо заземлять во избежание искрения от электризации и вспышки паров растворителя.

После разбавления лака необходимо проверить качество лаковой пленки, образуемой лаком при опускании в него полоски тонкой гладкой бумаги. Пленка не должна иметь крупинок. При наличии крупинок лак необходимо подогреть и после этого снова тщательно перемешать и проверить качество его пленки. Свернувшийся лак в результате неправильной технологии приготовления или несоответствующего разбавителя для пропитки обмоток непригоден.

Пропитка статоров малых и средних машин произ-

водится методом погружения их в бак, наполненный изоляционным лаком соответствующей вязкости.

Пропитка статорных обмоток больших машин производится методом пульверизации или обливанием обмотки изоляционным лаком сперва с одной стороны, а после переворачивания статора — с другой. Для покрытия лаком статор ставится на противень, куда при пульверизации или обливке стекает лак. Продолжительность пропитки статора, погруженного в бак, 10—20 *мин.* Пропитка считается законченной, когда прекратится выделение с поверхности лака пузырьков воздуха.

После пропитки статор ставится на стеллаж так, чтобы лишний лак с него свободно стекал. Время выдержки пропитанного статора на воздухе 30—60 *мин.* Перед загрузкой пропитанного статора в сушильную печь все поверхности, где не должно быть лаковой пленки (замки, расточка статора и выводные концы), протираются тряпкой, смоченной в растворителе.

Температура сушки обмотки статора, пропитанного различными изоляционными лаками, для классов изоляции А, Е выбирается 110—125° С и для класса изоляции В — 120—140° С.

Время сушки обмоток, пропитанных масляно-битумными лаками № 458, 447, 460, алкидно-меламиновым МЛ-92 (б. МГМ-16), масляно-алкидным ГФ-95 (б. 1154), водноэмульсионными 321-Т, ПФЛ-8 *в* и аналогичных им — от 6 до 12 *ч.*

Для повышения качества изоляции применяется двойная пропитка, а повторная сушка производится при режимах, как для первой сушки.

В целях придания обмотке повышенной влагостойкости и гладкой блестящей поверхности лобовые части дополнительно покрывают покровным лаком БТ-99 (б. 462-п) воздушной сушки. Покровный лак наносится на подогретые обмотки. При влагостойком исполнении обмоток применяется лак № 460 печной сушки.

Лаки № 458, 447, 460 и БТ-99 создают влаго- и теплостойкую пленку, но не маслостойки. Для придания пленке маслостойкости рекомендуется применять лак ГФ-95 (б. № 1154). Лак МЛ-92 хорошо цементирует обмотку, влаго- и маслостоек.

Для придания обмоткам маслостойкости и механической прочности после пропитки их покрывают эмалями

ГФ-92ХС (б. СВД), ГФ-92 ГС (б. СПД) и др., которые наносятся на обмотку кистью, пульверизатором и — реже — окунанием.

Сушка обмоток электрических машин считается законченной, если сопротивление изоляции в течение 1—2 *ч* практически не изменяется, а величина ее не ниже рекомендованного минимального предела.

Сопротивление изоляции обмоток измеряется мегомметром напряжением 500 *в* для обмоток электродвигателей с номинальным напряжением до 500 *в* и мегомметром на 1 000 *в* при более высоком напряжении обмоток электродвигателей. Общепринято, что сопротивление изоляции обмоток при температуре 70—80° С должно быть не ниже 1 *Мом* на 1 *кв* рабочего напряжения для обмотки статора и 0,5 *Мом* для обмотки ротора, а при частичном ремонте ротора или после профилактической сушки 0,2 *Мом*.

Примечание. Величина сопротивления изоляции не нормирована.

Внешним признаком достаточной сушки является отсутствие отлипа лаковой пленки.

Во время пропитки и при сушке обмоток электрических машин необходимо строго соблюдать правила техники безопасности и противопожарной безопасности.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ИСПЫТАНИЕ АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСЛЕ РЕМОНТА

43. ВИДЫ И ОБЪЕМ ИСПЫТАНИЙ

Все электродвигатели независимо от характера произведенного ремонта должны пройти соответствующие испытания.

Как известно, ГОСТ 183-55 устанавливает перечень и объем испытаний для изготовленных электродвигателей. Применить полностью эту программу испытаний для электродвигателей, у которых был произведен ремонт, было бы нецелесообразно. В ремонтной практике методику испытаний применяют в соответствии с требованиями ГОСТ 183-55 и 7217-59, а программу испытаний устанавливают в зависимости от произведенного ремонта электродвигателя. На ремонтных предприятиях объем испытаний обычно регламентируется техническими условиями, вырабатываемыми, исходя из местных условий и требований ГОСТ.

Ниже приводятся перечень и краткое описание испытаний и проверок прошедшего ремонт электродвигателя.

44. ВНЕШНИЙ ОСМОТР. ИЗМЕРЕНИЕ ЗАЗОРОВ

Внешним осмотром проверяют качество и комплектность деталей, узлов и механизмов, легкость вращения ротора, отсутствие задевания вращающихся частей за неподвижные, качество покраски и пр. При наличии дефектов электродвигатель к испытаниям не допускается.

Измерение зазоров между статором и ротором производится при помощи набора длинных пластинчатых щупов. Зазор измеряют в четырех равномерно расположенных по окружности точках, с обеих сторон электродвигателя. Разность между наибольшим и наименьшим зазорами не должна превышать 10% средней величины зазора.

45. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ОТНОСИТЕЛЬНО КОРПУСА И МЕЖДУ ФАЗАМИ (ОБМОТКАМИ)

При транспортировке статора и фазного ротора к месту сборки и в процессе сборки электродвигателя могли произойти повреждения изоляции обмоток, поэтому до начала испытания электродвигателя необходимо измерить сопротивление изоляции каждой фазы обмотки относительно корпуса и между собой. Если выведены только три конца обмотки, то измеряется сопротивление изоляции всей обмотки относительно корпуса. Так как сопротивление изоляции уменьшается с нагревом обмоток, то в случаях, когда по характеру произведенного ремонта требуется проводить испытание электродвигателя под нагрузкой, рекомендуется производить второе измерение сопротивления изоляции обмоток сразу же после испытания под нагрузкой на нагрев.

Согласно ГОСТ 183-55 сопротивление изоляции должно быть не ниже значения, полученного по формуле

$$R_{из} = \frac{U}{1\,000 + \frac{P}{100}}, \; Мом,$$

где U — номинальное напряжение электродвигателя, *в*;
P — номинальная мощность электродвигателя, *ква*.

Часто пользуются следующим достаточно точным определением: сопротивление изоляции электродвигателя должно быть не менее 1 000 *ом* на 1 *в* рабочего напряжения.

Сопротивление изоляции измеряется мегомметром на 500 *в* при номинальном напряжении электродвигателя до 500 *в* включительно.

46. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК ПРИ ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

Измерение сопротивления обмоток электродвигателя при постоянном токе производят в целях контроля качества обмотки и в случаях измерения температуры обмоток при испытании электродвигателя на нагрев. Отклонение в величине сопротивлений отдельных фаз не должно превышать ±3%. Большее отклонение сопро-

тивления от средней величины свидетельствует о неравенстве числа витков в фазах, наличии короткозамкнутых витков, плохих контактах. При недоступности нулевой точки сопротивление измеряют между фазами 1—2, 2—3, 3—1.

Для измерения сопротивлений чаще всего применяют метод амперметра и вольтметра и метод мостов. При первом методе производят одновременно отсчет величины напряжения и тока; разделив показание вольтметра в вольтах на показание амперметра в амперах, получают величину сопротивления в омах. Амперметр и вольтметр должны быть класса точности не ниже 0,5. Измерение сопротивления обмотки при помощи мостов излагается в описаниях к ним.

Измерение сопротивления обмоток для определения температуры перегрева производится 2 раза: первый раз — в практически холодном состоянии электродвигателя, т. е. при температуре, равной температуре охлаждающей среды или отличной от нее не более чем на $\pm 3°$ С, второй раз — при нагрузке электродвигателя и установившейся температуре[1] обмоток. Измерение сопротивления обмоток в целях контроля за их качеством производится в холодном состоянии электродвигателя.

Для сравнения величин сопротивлений обмоток однотипных электродвигателей или для сравнения полученных измерением сопротивлений с расчетными или заводскими данными сопротивление обмоток измеряют при 15° С или же приводят измеренные при иной температуре сопротивления к температуре 15° С по формулам:

$$R_{15} = \frac{250}{235 + t} R_t, \text{ ом (для обмоток из медных проводов);}$$

$$R_{15} = \frac{260}{245 + t} R_t, \text{ ом (для обмоток из алюминиевых проводов),}$$

где t — температура обмотки во время измерения сопротивления ее;
R_t — измеренное сопротивление обмотки при температуре t.

47. ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ МАРКИРОВКИ ВЫВОДНЫХ КОНЦОВ

Для определения правильности маркировки выводных концов можно применить следующий способ.

Берут две любые фазы и произвольно соединяют два конца, назвав их C_5, C_6 (рис. 104,*а*), а к другим концам этих фаз C_2, C_3 подают номинальное напряжение. К концам фазы C_1, C_4 подключают электролампу. Если взятые нами фазы II и III включены согласно, то при включении рубильника лампа загорится. Это означает, что обмотки фаз II и III включены так, что ток, протекая по обеим обмоткам в одном направлении (последовательно), создает совпадающие по направлению магнитные потоки. Результирующий поток, пересекая витки обмотки I фазы, наводит в ней э. д. с., и лампа загорается. Следовательно, если конец C_6 является концом III фазы, то

[1] Установившейся температурой какой-либо части электрической машины называется температура, изменение которой в течение 1 *ч* не превышает 1° С при условии, что нагрузка машины и температура охлаждающей среды остаются неизменными.

конец C_5 является началом II фазы, поэтому мы вместо C_5 делаем обозначение C_2, а вместо C_2 — обозначение C_5.

Если бы напряжение было подано на концы C_3 и C_5 (рис. 104,б), а соединены между собой были бы концы фаз обмотки C_2 и C_6, то ток, протекая по обеим обмоткам фаз в разных направлениях, со-

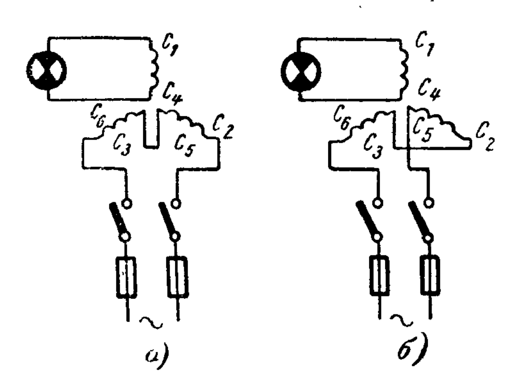


Рис. 104. Фазировка обмотки асинхронного электродвигателя.

а — первая схема фазировки; *б* — вторая схема фазировки.

здал бы магнитные потоки, уравновешивающие друг друга. Лампа в этом случае не загорится.

Затем берем обмотку I фазы в паре с обмоткой II или III фазы и таким же путем определяем ее начало и конец (C_1 и C_4).

48. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА И ПОТЕРЬ ХОЛОСТОГО ХОДА

Проведение опыта холостого хода обязательно для всех прошедших ремонт электродвигателей. Если обмоточные данные остались неизменными и известна мощность электродвигателя, то производят все указанные ниже измерения и проверки, кроме измерения потерь холостого хода. При изменении скорости вращения, значительном изменении сечения обмоточного провода или изменении материала провода, а также при неизвестной мощности электродвигателя производят измерение потерь холостого хода путем включения одного трехфазного или двух однофазных ваттметров.

При проведении опыта холостого хода электродвигатель подключается к сети с напряжением, равным номинальному напряжению электродвигателя, на 2 *ч*. Во время работы электродвигателя на холостом ходу производят:

а) Замер тока холостого хода во всех трех фазах. Величина тока холостого хода не должна превышать нормальной величины для данного типа электродвигателя. Обычно величина тока холостого хода исчисляется в процентах номинального тока. В табл. 12 ука-

заны допустимые величины тока холостого хода в процентах номинального в зависимости от мощности и скорости вращения электродвигателя.

Неравномерность тока холостого хода по фазам допускается не более ±5% средней величины.

Измерение тока холостого хода производят после того, когда произошла приработка вращающихся частей (обкатка) электродвигателя.

Таблица 12

Допустимые величины тока холостого хода электродвигателей в процентах номинального

Мощность электродвигателя, *квт*	Скорость вращения электродвигателя, *об/мин*					
	3 000	1 500	1 000	750	600	500
От 0,1 — до 0,5	60	75	85	90	95	—
0,51 — 1,0	50	70	75	80	85	90
1,1 — 5,0	45	65	70	75	80	85
5,1 — 10,0	40	60	65	70	75	80
10,1 — 25,0	30	55	60	65	70	75
25,1 — 50,0	20	50	55	60	65	70
50,1 — 100	—	40	45	50	55	60

б) Проверка скорости вращения электродвигателя. Проверку скорости вращения электродвигателя производят при помощи тахометра.

в) Проверка нагрева электродвигателя. В случае чрезмерного нагрева электродвигателя выясняют причину нагрева и устраняют ее (большой ток холостого хода, витковое замыкание, задевание ротора о статор и др.).

г) Проверка величины вибрации электродвигателя и наличия биения вала. Вибрация не должна превышать 0,09 *мм* для машин со скоростью вращения до 1 500 *об/мин* и 0,06 *мм* для более быстроходных; биение вала не допускается.

д) Проверка работы смазочных колец подшипников скольжения, проверка нагрева подшипников и масла.

е) Проверка нормальной работы электродвигателя «на слух». В двигателе должно быть тихое равномерное гудение активной стали, не должно быть стука, дребезжания, шорохов.

49. ПРОВЕРКА СИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ НА РАЗОМКНУТЫХ КОЛЬЦАХ ФАЗНОГО РОТОРА

Подключают электродвигатель с разомкнутыми фазами ротора к сети и замеряют вольтметром напряжение между каждой парой контактных колец.

Разность напряжений между кольцами не должна превышать ±2%.

50. ИСПЫТАНИЕ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

Испытанию при повышенной скорости вращения подлежат те электродвигатели, роторам которых произведен ремонт (ремонт обмотки фазного ротора, замена бандажей, ремонт беличьей клетки короткозамкнутого ротора, ремонт сердечника, ремонт вентилятора и других вращающихся частей).

Электродвигатель должен выдержать повышенную на 20% скорость вращения в течение 2 *мин* без повреждений и остаточных деформаций, обнаруживаемых внешним осмотром.

Необходимая повышенная скорость вращения испытываемого электродвигателя может быть получена путем вращения его посторонним электродвигателем или повышением частоты тока, питающего электродвигатель.

51. ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МЕЖДУВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Испытание электрической прочности междувитковой изоляции дает возможность выявить места с ослабленной витковой изоляцией.

Изоляция обмотки между смежными витками должна выдержать в течение 5 *мин* испытание повышенным напряжением, равным 1,3 номинального. Испытание электродвигателя с короткозамкнутым ротором производится при холостом ходе, испытание электродвигателя с фазным ротором — при разомкнутой обмотке ротора.

В случае пробоя изоляции и отсутствия внешних признаков витковое замыкание будет обнаружено при испытании электродвигателя под нагрузкой по его чрезмерному нагреву и появлению дыма.

Если испытание под нагрузкой не входит в программу испытаний электродвигателя, то витковое замыкание можно обнаружить при помощи аппаратов СМ-1, СМ-2, ЕЛ-1 и др.

Витковое замыкание можно также обнаружить при холостом ходе электродвигателя по неравномерности тока в фазах, нагреву обмотки и — через некоторое время — по появлению дыма от обгорания изоляции проводов в очаге виткового замыкания.

52. ИСПЫТАНИЕ ПОД НАГРУЗКОЙ (НА НАГРЕВ)

Испытание под нагрузкой производят для определения мощности электродвигателя по нагреву обмотки и других частей.

Электродвигатель подключается к сети и нагружается до расчетной мощности.

В качестве нагрузки чаще всего используют генераторы переменного или постоянного тока, которые отдают электроэнергию в сеть или нагружаются реостатом.

Испытание электродвигателя под нагрузкой производится до установившейся температуры отдельных частей электродвигателя.

При установившейся температуре обмоток электродвигателя превышение ее над температурой охлаждающей среды не должно быть выше 60° С при измерении методом термометра и 65° С при измерении методом сопротивлений для изоляции класса А, для изоляции классов Е и В — соответственно 75 и 85° С.

Если превышение установившейся температуры обмоток над температурой охлаждающей среды больше указанных выше величин, необходимо номинальную мощность электродвигателя принять меньшей, чем расчетная, и, наоборот, если превышение установившейся температуры меньше указанных выше величин, следует номинальную мощность электродвигателя принять большей, чем расчетная.

Мощность следует уменьшить или увеличить до такого значения, при котором превышение температуры обмотки над температурой охлаждающей среды будет соответствовать ГОСТ 183-55.

Возможны случаи, когда величину мощности будет ограничивать не температура перегрева обмоток, а температура нагрева подшипников или контактных колец (электродвигатели с фазным ротором), поэтому при определении номинальной мощности электродвигателя необходимо учитывать нагрев подшипников и контактных колец.

Температура нагрева подшипников не должна превышать 80° С для подшипников скольжения и 95° С для подшипников качения.

Превышение температуры контактных колец при изоляции класса А не должно превышать 70° С, а при изоляции класса В 90° С.

Указанные выше величины превышения температуры обмотки и контактных колец над температурой охлаждающей среды установлены ГОСТ 183-55 с учетом, что температура охлаждающей среды не превышает +35° С. Если температура охлаждающей среды выше +35° С, то предельные допустимые превышения температуры частей электродвигателя должны быть уменьшены на разность между температурой охлаждающей среды и температурой +35° С.

При испытании электродвигателей на нагрев измеряют: величину тока и напряжения, подведенную (потребляемую) мощность, скорость вращения электродвигателя, сопротивление обмоток при измерении температуры нагрева методом сопротивлений, температуру подшипников, контактных колец. Также проверяют работу смазочных устройств, щеток, контактных колец и др.

При проведении испытания на нагрев рекомендуется дать электродвигателю кратковременную перегрузку по току, равную:

а) для электродвигателей мощностью 0,6 *квт* и выше — полуторакратный номинальный ток в течение 2 *мин*;

б) для электродвигателей мощностью до 0,6 *квт* — полуторакратный номинальный ток в течение 1 *мин*.

Электродвигатель должен выдержать указанную выше перегрузку по току без повреждений и остаточных деформаций.

53. ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК

Все электродвигатели независимо от объема и характера ремонта должны пройти испытание электрической прочности изоляции.

При полной замене обмотки изоляция обмотки относительно корпуса электродвигателя и между фазами (обмотками) (при выведенных шести выводах обмотки) должна выдержать в течение 1 *мин* следующее испытательное напряжение:

а) для машин мощностью менее 1 *квт*, а также всех машин на номинальное напряжение не свыше 36 *в* — 500 *в* плюс двукратное номинальное напряжение;

б) для машин мощностью 1—3 *квт* (включительно) при номи-

нальном напряжении свыше 36 *в* — 1 000 *в* плюс двукратное номинальное напряжение;

в) для машин 3—1 000 *квт* при номинальном напряжении свыше 36 *в* — 1 000 *в* плюс двукратное номинальное напряжение, но не меньше 1 500 *в*.

Если при ремонте заменена лишь часть обмотки, то электрическую прочность всей обмотки испытывают напряжением, равным 1,3 номинального напряжения, но не меньшим, чем 0,5 испытательных напряжений, указанных выше.

Испытание электрической прочности изоляции обмоток производят при неподвижном состоянии электродвигателя.

Напряжение подается от испытательного трансформатора, мощность которого должна быть не менее 1 *ква* на 1 *кв* испытательного напряжения. При испытании один полюс источника испытательного напряжения подключается к испытываемой обмотке, а другой — к заземленному корпусу электродвигателя. При наличии выводов от начала и конца каждой фазы испытание относительно корпуса электродвигателя должно быть произведено поочередно для каждой фазы при присоединенных к корпусу электродвигателя остальных двух фазах.

Испытание начинают с напряжения, не превышающего одной трети испытательного напряжения. Далее постепенно, или ступенями, не превышающими 5% полного значения, поднимают напряжение до полного значения испытательного напряжения. Время, допускаемое для подъема испытательного напряжения от половинного до полного значения, должно быть не менее 10 *сек*. Полное испытательное напряжение выдерживают в течение 1 *мин*, после чего напряжение плавно снижают до $^1/_3$ полного значения и отключают.

Пробой изоляции можно заметить по резкому падению подведенного напряжения в момент пробоя, появлению искр и треска от проскальзывающих искр, выделению дыма.

Результаты испытания считаются удовлетворительными, если во время испытания не произошло пробоя изоляции.

Испытание электрической прочности изоляции производится после испытания при повышенной скорости вращения, испытания электрической прочности междувитковой изоляции и испытания на нагрев, когда электродвигатель находится в нагретом состоянии после испытания под нагрузкой. Если испытание под нагрузкой не производится, то испытание изоляции на пробой производится в холодном состоянии электродвигателя в конце намеченной программы испытаний.

54. ПРОВЕРКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Опыт короткого замыкания электродвигателя производят для проверки качества заливки или пайки короткозамкнутых роторов.

Электродвигатель с заторможенным ротором включают на напряжение, составляющее 15—20% номинального, затем напряжение поднимают до значения, при котором в обмотке статора будет проходить ток, равный номинальному. Если имеются дефекты заливки или пайки (разрывы стержней или короткозамыкающих колец беличьей клетки ротора, трещины, незалитые пазы), то токи в фазах будут неодинаковыми по величине. При проворачивании ротора будет про-

исходить периодическое перераспределение неравномерности тока между фазами.

Остановимся теперь на методике определения коэффициента мощности, к. п. д. и номинальной мощности электродвигателя.

При испытании электродвигателя на нагрев мы устанавливали допустимую для него нагрузку, при которой превышение температуры обмотки над температурой охлаждающей среды не выходило бы за пределы установленных ГОСТ 183-55 величин.

Превышение температуры обмотки (Θ), изготовленной из меди, над температурой охлаждающего воздуха (охлаждающей среды) при определении по методу сопротивлений подсчитывается по формуле

$$\Theta = t_2 - t_0 = \frac{R_2 - R_x}{R_x}(235 + t_x) + t_x - t_0, \qquad (58)$$

где t_2 — температура обмотки в нагретом состоянии, °С;

t_0 — температура охлаждающего воздуха, °С;

t_x — температура обмотки в практически холодном состоянии, °С;

R_2 — сопротивление обмотки в нагретом состоянии, *ом*;

R_x — сопротивление обмотки в практически холодном состоянии, *ом*.

Если обмотка изготовлена из алюминия, то в формуле (58) цифру 235 следует заменить цифрой 245.

При определении превышения температуры обмотки или других частей электродвигателя над температурой охлаждающей среды методом термометра измеряют температуру данной части электродвигателя в нагретом состоянии t_2, температуру охлаждающего воздуха t_0 и вычисляют превышение температуры по формуле

$$\Theta = t_2 - t_0.$$

Измерение температуры нагрева электродвигателей переменного тока производят спиртовыми термометрами, так как ртутные в условиях переменных магнитных полей могут дать неверные результаты.

Коэффициент мощности электродвигателя определяют по формуле

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3}UI},$$

где P_1 — потребляемая мощность электродвигателя в ваттах, замеренная ваттметрами при испытании электродвигателя под нагрузкой;

U — номинальное напряжение электродвигателя, *в*;

I — ток, измеренный при испытании электродвигателя под нагрузкой, соответствующий по нагреву номинальной мощности электродвигателя, *а*.

Для определения полезной мощности на валу, называемой номинальной мощностью электродвигателя, можно воспользоваться простым, но менее точным способом, а именно:

1. Определяют к. п. д. в зависимости от величины расчетной мощности и скорости вращения электродвигателя по таблицам значений $\cos\varphi$ и η (см. приложения 5 и 6).

2. Определяют полезную мощность электродвигателя по формуле

$$P = P_1\eta = \sqrt{3}\, UI \cos\varphi\eta, \ вт.$$

Более точным, но и более сложным методом определения полезной мощности электродвигателя является метод определения потерь по опыту холостого хода и испытанию электродвигателя под нагрузкой.

Если от потребляемой при нагрузке мощности электродвигателя отнять механические потери ($p_{мех}$), потери в стали ($p_{ст}$), потери в обмотке статора ($p_{м1}$), потери в обмотке ротора ($p_{м2}$) и добавочные потери ($p_д$), то получим полезную мощность электродвигателя:

$$P = P_1 - \Sigma p = P_1 - (p_{мех} + p_{ст} + p_{м1} + p_{м2} + p_д),$$

где P — полезная мощность электродвигателя, *вт*;
P_1 — потребляемая мощность электродвигателя, *вт*;
Σp — сумма перечисленных выше потерь, *вт*.

Разделив полезную мощность P на потребляемую мощность P_1, получим к. п. д. электродвигателя:

$$\eta = \frac{P_1 - \Sigma p}{P_1} = \frac{P}{P_1}.$$

Метод подсчета отдельных потерь изложен в ГОСТ 7217-59 и специальной технической литературе по испытаниям электрических машин.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО НАГРЕВОСТОЙКОСТИ

К электроизоляционным материалам предъявляются следующие требования:

1. Достаточная электрическая прочность, которая определяется пробивным напряжением и выражается в киловольтах на 1 *мм* толщины изоляции.

2. Достаточная нагревостойкость, т. е. способность изоляции длительно выдерживать без повреждений действие повышенной температуры.

3. Высокая механическая прочность, а также гибкость и эластичность.

4. Хорошая теплопроводность.

5. Стойкость против действия растворителей эмалей и лаков.

6. Сохранение изолирующих свойств с течением времени при нагреве и воздействии влаги.

7. Малая толщина изоляционного слоя, определяемая диэлектрическими свойствами материала.

8. Невысокая стоимость и недефицитность.

По нагревостойкости (теплостойкости) изоляционные материалы делят на семь классов (ГОСТ 8865-58).

К классу У (по старому обозначению класс 0) относятся материалы из непропитанных и не погруженных в жидкий диэлектрик волокнистых материалов: хлопчатобумажное волокно, бумага, картон, фибра, дерево, натуральный шелк и др. и их сочетания, соответствующие данному классу нагревостойкости. Максимальная рабочая температура изоляционных материалов классов У 90° С.

К классу А относятся материалы класса У, если они пропитаны масляными, масляно-смоляными и иными изоляционными лаками, а также другие материалы и их сочетания, соответствующие данному классу нагревостойкости. Наибольшая допустимая температура изоляционных материалов класса А 105° С, превышение температуры над температурой окружающего воздуха 70° С.

К классу Е (по старому обозначению класс АВ) относятся некоторые синтетические органические пленки, а также другие материалы и их сочетания, соответствующие данному классу нагревостойкости. Наибольшая допустимая температура изоляционных материалов класса Е 120° С, превышение температуры над температурой окружающего воздуха 85° С.

К классу В относятся материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, изготовленные с применением органических связующих материалов обычной нагревостойкости, например: миканит, микафолий, микалента, асбестовая бумага, асбестовая лента, стеклолакоткань, стеклотекстолит и другие материалы и их сочетания, соответствующие данному классу нагревостойкости. Наибольшая допустимая температура изоляционных материалов класса В 130° С, превышение температуры над температурой окружающего воздуха 95° С.

К классу F (по старому обозначению класс ВС) относятся материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна в сочетании с синтетическими связующими и пропиточными составами, а также другие материалы, соответствующие данному классу. Наибольшая допустимая температура изоляции класса F 155° С, превышение температуры над температурой окружающего воздуха 120° С.

К классу Н (по старому обозначению класс СВ) относятся материалы из слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, а также другяе материалы, соответствующие данному классу. Наибольшая допустимая температура изоляции класса Н 180° С, превышение температуры над температурой окружающего воздуха 145° С.

К классу С относятся: слюда, фарфор, стекло, кварц без связующих веществ и материалов органического происхождения. Рабочая температура изоляции класса С выше 180° С, максимальная температура ввиду большой нагревостойкости не устанавливается.

Из перечисленных выше семи классов изоляции изоляция класса У в электромашиностроении почти не применяется, а изоляция класса С применяется редко.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

МАРКИ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ (ПО ГОСТ 2773-52, 6324-52, 7262-54, 7019-60, 10288-62) НА МЕДНЫЕ ПРОВОДА, ТУ НА АЛЮМИНИЕВЫЕ ПРОВОДА: ТУ КП 49-59, ТУ КП33-58 И ГОСТ 9761-61

I. С эмалевой изоляцией

ПЭЛ — изолированный лакостойкой эмалью на масляно-смоляной основе, класс изоляции А, изготовляется размерами ∅ 0,05—2,44 *мм.*

ПЭЛУ — изолированный лакостойкой эмалью на масляно-смоляной основе, имеет утолщенную изоляцию (класс А), изготовляется размерами ∅ 0,05—2,44 *мм.*

ПЭВ-1 — изолированный одним слоем высокопрочной эмали на поливинилацеталевой основе (винифлекс), класс изоляции А, изготовляется размерами ∅ 0,06—2,44 *мм.*

ПЭВ-2 — изолированный двумя слоями высокопрочной эмали на поливинилацеталевой основе (винифекс), класс изоляции А, изготовляется размерами ∅ 0,06—2,44 *мм.*

ПЭЛР-1 — изолированный одним слоем высокопрочной эмали на полиамиднорезольном лаке, класс изоляции А, изготовляется размерамн ∅ 0,10—2,44 *мм*.

ПЭЛР-2 — изолированный двумя слоями высокопрочной эмали на полиамиднорезольном лаке, класс изоляцин А, нзготовляется размерами ∅ 0,10—2,44 *мм*.

ПЭМ-1 — изолированный тонким слоем высокопрочной эмалн из лака металвин, класс изоляции А, изготовляется размерами ∅ 0,06—2,44 *мм*.

ПЭМ-2 — то же, но изолированный усиленным слоем высокопрочной эмали.

ПЭВТЛ-1 — изолированный нагревостойкой высокопрочной полиуретановой эмалью, класс изоляцин Е, изготовляется размерами ∅ 0,06—1,0 *мм*.

ПЭВТЛ-2 — то же, но изолированный усиленным слоем полиуретановой эмали.

ПЭТВ — изолированный нагревостойкой высокопрочной эмалью на основе полиэфиров терефталевой кислоты, класс изоляции В, изготовляется размерами ∅ 0,06—2,44 *мм*.

ПЭТК — изолированный нагревостойкой кремнийорганической эмалью, класс нзоляции F, изготовляется размерами ∅ 0,05—0,74 *мм* и (0,83—1,95) × (2,1—4,7) *мм*.

ПЭВА-1 — алюминиевый провод, изолированный одним слоем высокопрочной эмали иа поливинилацеталевом лаке (винифлекс), класс изоляции Е, изготовляется размерами ∅ 0,57—2,44 *мм*.

ПЭВА-2 — то же, но изолированный двумя слоями высокопрочной эмали.

ПЭЛРА-1 — алюминиевый провод, изолированный одним слоем высокопрочной эмали на полиамиднорезольном лаке, класс изоляции А, изготовляется размерами ∅ 0,57—2,44 *мм*.

ПЭЛРА-2 — то же, но изолированный двумя слоями высокопрочной эмали.

II. С волокиистой изоляцией

ПБО — изолированный одним слоем обмотки из хлопчатобумажной пряжи класс изоляции А, изготовляется размерами ∅ 0,2—2,10 *мм* и (0,9—5,5) × (2,1—14,5).

ПБД — изолированный двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи, класс изоляции А, изготовляется размерами ∅ 0,2—5,2 *мм* и (0,9—5,5) × (2,1—14,5) *мм*.

ПБОО — изолированный одним слоем обмотки из хлопчатобумажной пряжи и в оплетке из хлопчатобумажной пряжи, класс изоляции А, изготовляется размерами ∅ 1,0—5,2 *мм* и (0,9—5,5) × × (2,1—14,5) *мм*.

ПШД — изолированный двумя слоями обмотки из натурального шелка, класс изоляции А, изготовляется размерами (0,83—1,16) × × (2,83—3,8) *мм*.

ПШКД — то же, ио изолированный двумя слоями обмотки из шелка капрон.

ПСД — изолированный двумя слоями обмотки из бесщелочного стекловолокиа с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком,

класс изоляции F, изготовляется размерами ∅ 0,31—5,2 и (0,9—5,5)×
×(2,1—12,5) *мм*.

ПСДК — то же с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком, класс изоляции Н.

ПДА — изолированный одним слоем асбестовой ровницы с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком, класс изоляции F, изготовляется размерами ∅ 1,0—4,8 *мм* и (1,16—5,1)×(2,1—7,4) *мм*.

АПСД — алюминиевый провод, изолированный двумя слоями обмотки из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком, класс изоляции F.

АПБД — алюминиевый провод, изолированный двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи, класс изоляции А, изготовляется размерами ∅ 1,35—8,0 *мм* и (1,81—7,0)×(4,1—18) *мм*.

III. С комбинированной изоляцией

ПЭЛШО — изолированный лакостойкой эмалью на масляно-смоляной основе и одним слоем обмотки из натурального шелка, класс изоляции А, изготовляется размерами ∅ 0,05—2,1 *мм*.

ПЭЛШКО — то же, но изолированный одним слоем обмотки из шелка капрон.

ПЭЛШД — изолированный лакостойкой эмалью на масляно-смоляной основе и двумя слоями обмотки из натурального шелка, класс изоляции А, изготовляется ∅ 0,86 *мм*.

ПЭЛШКД — то же, но изолированный двумя слоями обмотки из шелка капрон.

ПЭЛБО — изолированный лакостойкой эмалью на масляно-смоляной основе и одним слоем обмотки из хлопчатобумажной пряжи, класс изоляции А, изготовляется размерами ∅ 0,2—2,1 *мм*.

ПЭЛКО — изолированный лакостойкой эмалью на масляно-смоляной основе и одним слоем обмотки из утолщенного шелка капрон, класс изоляции А, изготовляется размерами ∅ 0,2—2,1 *мм*.

ПЭЛБД — изолированный лакостойкой эмалью на масляно-смоляной основе и двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи, класс изоляции А, изготовляется размерами ∅ 0,72—2,1 *мм*.

ПЭВШО — изолированный высокопрочной эмалью (винифлекс) и одним слоем обмотки из натурального или искусственного шелка, класс изоляции А, изготовляется размерами ∅ 0,05—1,56 *мм*.

ПЭТСО — изолированный нагревостойкой эмалью и одним слоем обмотки из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком, класс изоляции В, изготовляется размерами ∅ 0,31—2,10 *мм*.

ПЭТКСО — изолированный нагревостойкой кремнийорганической эмалью и одним слоем обмотки из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком, класс изоляции *H*, изготовляется размерами ∅ 0,38—1,56 *мм*.

РАЗМЕРЫ КРУГЛЫХ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ (ПО ГОСТ 6324-52)

Диаметр голого провода, *мм*	Сечение голого провода, *мм*^{2}	Диаметр голого провода, *мм*	Сечение голого провода, *мм*^{2}
0,05	0,00196	0,83	0,541
0,06	0,00283	0,86	0,581
0,07	0,00385	0,90	0,636
0,08	0,00503	0,93	0,679
0,09	0,00636	0,96	0,724
0,10	0,00785	1,00	0,785
0,11	0,00950	1,04	0,849
0,12	0,01131	1,08	0,916
0,13	0,01327	1,12	0,985
0,14	0,01539	1,16	1,057
0,15	0,01767	1,20	1,131
0,16	0,0201	1,25	1,227
0,17	0,0227	1,30	1,327
0,18	0,0255	1,35	1,431
0,19	0,0284	1,40	1,539
0,20	0,0314	1,45	1,651
0,21	0,0346	1,50	1,767
0,23	0,0415	1,56	1,911
0,25	0,0491	1,62	2,06
0,27	0,0573	1,68	2,22
0,29	0,0661	1,74	2,38
0,31	0,0755	1,81	2,57
0,33	0,0855	1,88	2,78
0,35	0,0962	1,95	2,99
0,38	0,1134	2,02	3,20
0,41	0,1320	2,10	3,46
0,44	0,1521	2,26	4,01
0,47	0,1735	2,44	4,68
0,49	0,1886	2,63	5,43
0,51	0,204	2,83	6,29
0,53	0,221	3,05	7,31
0,55	0,238	3,28	8,45
0,57	0,255	3,53	9,79
0,59	0,273	3,80	11,34
0,62	0,302	4,10	13,20
0,64	0,322	4,50	15,90
0,67	0,353	4,80	18,10
0,69	0,374	5,20	21,2
0,72	0,407	—	—
0,74	0,430	—	—
0,77	0,466	—	—
0,80	0,503	—	—

МАКСИМАЛЬНАЯ ДВУСТОРОННЯЯ ТОЛЩИНА ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОЧНЫХ КРУГЛЫХ ПРОВОДОВ (ПО ГОСТ 2773-51, 6324-52, 7262-54, 7019-60, 10288-62 НА МЕДНЫЕ ПРОВОДА и ТУ НА АЛЮМИНИЕВЫЕ ПРОВОДА)

Марка провода	Диаметр голой проволоки, *мм*					
	0,05—0,09	0,10—0,19	0,20—0,25	0,27—0,29	0,31—0,35	0,38—0,49
ПЭЛ	—	0,02	0,025	0,04	0,04	0,04—0,05
ПЭЛУ	—	0,035	0,04	0,06	0,06	0,06—0,07
ПЭВ-1	0,025	0,025—0,033	0,03—0,04	0,04	0,04	0,04
ПЭВ-2	0,03	0,03—0,04	0,04—0,05	0,05	0,05—0,06	0,06
ПЭЛР-1	—	0,02—0,03	0,03	0,04	0,04	0,05
ПЭЛР-2	—	0,075	0,09	0,10	0,105	0,11
ПЭЛШО, ПЭЛШКО	0,07	0,075	0,09	0,10	0,105	0,11
ПЭЛБО, ПЭЛКО	—	—	0,125	0,155	0,16	0,165
ПЭЛБД	—	—	—	—	—	—
ПЭЛБТ	—	—	—	—	—	—
ПЭЛБВ	—	—	—	—	—	—
ПБО	—	—	0,10	0,12	0,12	0,12
ПБД	—	—	0,19	0,22	0,22	0,22
ПЭТСО	—	—	—	—	0,20	0,20
ПСД	—	—	—	—	0,23	0,23
ПДА	—	—	—	—	—	—
ПЭВА-1, ПЭЛРА-1	—	—	—	—	—	—
ПЭВА-2, ПЭЛРА-2	—	—	—	—	—	—
ПЭАТ	—	0,023—0,027	0,027—0,03	0,03	0,03	0,03
АПСД	—	—	—	—	—	—

Продолжение приложения 4

Марка провода	Диаметр голой проволоки, *мм*				
	0,51—0,69	0,72—0,96	1,00—1,45	1,50—2,10	2,26—5,20
ПЭЛ	0,05	0,06	0,07—0,08	0,08—0,10	—
ПЭЛУ	0,07	0,08—0,09	0,10—0,11	0,11—0,13	—
ПЭВ-1	0,05	0,05—0,06	0,08	0,08—0,10	—
ПЭВ-2	0,07—0,08	0,08—0,09	0,11	0,11—0,13	—
ПЭЛР-1	0,06	0,06	0,08	0,09	—
ПЭЛР-2	0,115	0,125	0,135	0,155	—
ПЭЛШО, ПЭЛШКО	0,115	0,125	0,135	0,155	—
ПЭЛБО, ПЭЛКО	0,17	0,18	0,21	0,21	—
ПЭЛБД	—	0,28	0,33	0,33	—
ПЭЛБТ	—	—	0,21	0,21	—
ПЭЛБВ	0,12	0,125	0,14	—	—
ПБО	0,12	0,12	0,14	0,14	—
ПБД	0,22	0,22	0,27	0,27	0,33
ПЭТСО	0,20	0,22	0,22	0,22—0,24	—
ПСД	0,25	0,25	0,27	0,27	0,33
ПДА	—	—	0,30	0,30	0,35
ПЭВА-1, ПЭЛРА-1	0,045	0,045—0,05	0,07	0,07—0,085	—
ПЭВА-2, ПЭЛРА-2	0,055—0,06	0,06—0,065	0,08	0,08—0,09	—
ПЭАТ	0,045	—	—	—	—
АПСД	—	—	—	0,25	0

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ И КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЗАЩИЩЕННОГО ИСПОЛНЕНИЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ МОЩНОСТЬЮ ДО 100 *квт* (ПО ГОСТ 186-52)

Мощность, *квт*	К. п. д. η, %				cos φ			
	Скорость вращения (синхронная), *об/мин*							
	3 000	1 500	1 000	750	3 000	1 500	1 000	750
0,6	—	74,0	—	—	—	0,76	—	—
1,0	79,0	78,5	77,0	—	0,86	0,79	0,72	—
1,7	81,5	81,5	79,5	—	0,87	0,82	0,75	—
2,8	84,0	83,5	82,5	—	0,88	0,84	0,78	—
4,5	85,5	85,5	84,5	83,5	0,88	0,85	0,80	0,76
7,0	87,0	87,0	86,0	85,0	0,89	0,86	0,81	0,78
10	87,5	87,5	86,5	85,0	0,89	0,88	0,82	0,80
14	87,5	88,5	87,0	87,0	0,89	0,88	0,83	0,81
20	88,5	89,0	88,0	88,0	0,90	0,88	0,84	0,82
28	89,0	90,0	89,0	89,0	0,90	0,88	0,85	0,83
40	90,0	90,5	90,0	90,0	0,91	0,89	0,86	0,84
55	90,5	91,0	91,0	91,0	0,91	0,89	0,87	0,84
75	91,0	91,5	92,0	—	0,91	0,89	0,88	—
100	91,5	92,0	—	—	0,92	0,89	—	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ И КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЗАЩИЩЕННОГО ИСПОЛНЕНИЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ МОЩНОСТЬЮ ДО 100 *квт* (ПО ГОСТ 186-52)

Мощность, *квт*	К. п. д. η, %			cos φ		
	Скорость вращения (синхронная), *об/мин*					
	1 500	1 000	750	1 500	1 000	750
1,7	—	72,5	—	—	0,72	—
2,8	78,0	75,5	—	0,82	0,74	—
4,5	80,0	78,5	76,5	0,83	0,76	0,72
7	82,0	81,0	79,5	0,84	0,78	0,74
10	83,5	82,5	81,5	0,85	0,79	0,76
14	84,5	84,0	83,0	0,86	0,80	0,77
20	86,0	85,0	84,5	0,86	0,81	0,79
28	87,0	86,5	86,0	0,87	0,82	0,80
40	88,0	87,5	87,5	0,87	0,83	0,81
55	89,0	88,5	88,5	0,87	0,83	0,82
75	90,0	89,5	—	0,88	0,84	—
100	90,5	—	—	0,88	—	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Таблица замены одного круглого провода двумя проводами, эквивалентными по суммарному сечению

	1,00	1,04	1,08	1,12	1,16	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,56	1,62	1,68
0,44	0,90	—	—	—	1,08	1,12	—	—	—	—	—	—	1,50	1,56	1,62
0,47	—	0,93	—	—	—	—	1,16	—	—	—	—	—	—	—	—
0,49	—	—	0,96	—	—	—	—	1,20	—	—	—	—	—	—	—
0,51	0,86	0,90	—	1,00	1,04	1,08	—	—	1,25	1,30	—	—	—	—	—
0,53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,35	1,40	—	—	—
0,55	0,83	—	0,93	—	—	—	1,12	—	—	—	—	—	—	—	—
0,57	—	—	—	0,96	—	—	—	1,16	—	—	—	—	1,45	—	—
0,59	0,80	0,86	0,90	—	1,00	1,04	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,62	—	0,83	—	0,93	—	—	1,08	—	1,20	1,25	—	—	—	1,50	1,56
0,64	0,77	—	0,86	—	0,96	—	—	1,12	—	—	1,30	1,35	—	—	—
0,67	—	0,80	—	0,90	—	1,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,69	0,72	0,77	0,83	—	0,93	—	1,04	—	1,16	—	—	—	1,40	—	—
0,72	0,69	0,74	0,80	0,86	—	0,96	—	1,08	—	1,20	—	—	—	1,45	—
0,74	—	0,72	—	0,83	0,90	—	1,00	—	1,12	—	1,25	1,30	—	—	—
0,77	0,64	0,69	—	0,80	0,86	—	—	1,04	—	1,16	—	—	1,35	—	1,50
0,80	0,59	0,67	0,72	0,77	0,83	0,90	0,96	—	1,08	—	1,20	—	—	1,40	—
0,83	0,55	0,62	0,69	0,74	0,80	0,86	0,93	1,00	—	1,12	—	1,25	—	—	—
0,86	0,51	0,59	0,64	0,72	0,77	0,83	0,90	0,96	1,04	—	1,16	—	1,30	—	1,45
0,90	0,44	0,51	0,59	0,67	0,74	0,80	0,86	0,93	1,00	1,08	—	1,20	—	1,35	—
0,93	—	0,47	0,55	0,62	0,69	—	0,83	0,90	0,96	1,04	1,12	—	1,25	—	1,40
0,96	—	—	0,49	0,57	0,64	0,72	0,80	0,86	0,93	1,00	1,08	1,16	—	1,30	—
1,00	—	—	—	0,51	0,59	0,67	0,74	0,83	0,90	0,96	1,04	1,12	1,20	—	1,35
1,04	—	—	—	—	0,51	0,59	0,69	0,77	0,86	0,93	1,00	1,08	1,16	1,25	1,30
1,08	—	—	—	—	0,44	0,51	0,62	0,72	0,80	0,90	0,96	1,04	1,12	1,20	—
1,12	—	—	—	—	—	0,44	0,55	0,64	0,74	0,83	0,93	1,00	1,08	1,16	1,25
1,16	—	—	—	—	—	—	0,47	0,57	0,69	0,77	0,86	0,96	1,04	1,12	1,20
1,20	—	—	—	—	—	—	—	0,49	0,62	0,72	0,80	0,90	1,00	1,08	1,16

	1,00	1,04	1,08	1,12	1,16	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,56	1,62	1,68
1,25	—	—	—	—	—	—	—	—	0,51	0,62	0,74	0,83	0,93	1,04	1,12
1,30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,51	0,64	0,74	0,86	0,96	1,04
1,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,53	0,64	0,77	0,90	1,00
1,40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,53	0,69	0,80	0,93
1,45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,57	0,72	0,86
1,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,44	0,62	0,77
1,56	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,44	0,62
1,62	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,44
1,68	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,88	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,44	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

	1,74	1,81	1,88	1,95	2,02	2,10	2,26	2,44	2,63	2,83	3,05	3,28	3,53	3,80	4,10	4,50	4,80	5,20
0,44	1,68	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,49	—	1,74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,51	—	—	1,81	1,88	1,95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,57	—	—	—	—	—	2,02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,59	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,62	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,64	1,62	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,67	—	1,68	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,69	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,72	—	—	1,74	1,81	1,88	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,77	1,56	—	—	—	—	1,95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,80	—	1,62	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,83	—	—	1,68	—	—	—	2,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,86	1,50	—	—	1,74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,90	—	1,56	—	—	1,81	—	—	2,26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,93	—	—	—	—	—	1,88	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,96	1,45	—	1,62	—	—	—	—	—	2,44	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,00	—	1,50	—	1,68	1,74	—	2,02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,04	1,40	—	1,56	—	—	—	—	—	—	2,63	—	—	—	—	—	—	—	—
1,08	1,35	1,45	—	1,62	—	1,81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,12	—	1,40	1,50	—	1,68	—	1,95	—	—	—	2,83	—	—	—	—	—	—	—
1,16	1,30	—	—	1,56	—	1,74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,20	1,25	1,35	1,45	—	1,62	—	—	—	—	—	—	3,05	—	—	—	—	—	—
1,25	1,20	1,30	1,40	1,50	1,56	1,68	1,88	2,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

	1,74	1,81	1,88	1,95	2,02	2,10	2,26	2,44	2,63	2,83	3,05	3,28	3,53	3,80	4,10	4,50	4,80	5,20
1,30	1,16	1,25	1,35	1,45	—	—	—	—	—	—	—	—	3,28	—	—	—	—	—
1,35	1,08	1,20	1,30	1,40	1,50	1,62	1,81	2,02	2,26	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,40	1,04	1,12	1,25	1,35	1,45	1,56	—	—	—	—	—	—	—	3,53	—	—	—	—
1,45	0,96	1,08	1,20	1,30	1,40	1,50	1,74	1,95	—	2,44	—	—	—	—	—	—	—	—
1,50	0,86	1,00	1,12	1,25	1,35	1,45	1,68	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,56	0,77	0,90	1,04	1,16	1,25	1,40	1,62	1,88	2,10	—	2,63	—	—	—	3,80	—	—	—
1,62	0,64	0,80	0,96	1,08	1,20	1,35	1,56	1,81	—	—	—	2,83	—	—	—	—	—	—
1,68	0,44	0,67	0,83	1,00	1,12	1,25	1,50	1,74	2,02	2,26	—	—	—	—	—	—	4,50	—
1,74	—	0,49	0,72	0,86	1,00	1,16	1,45	1,68	1,95	—	—	—	3,05	—	—	—	—	—
1,81	—	—	0,51	0,72	0,90	1,08	1,35	1,62	1,88	—	2,44	—	—	—	—	—	—	—
1,88	—	—	—	0,51	0,72	0,93	1,25	1,56	1,81	2,10	—	—	—	3,28	—	4,10	—	—
1,95	—	—	—	—	0,51	0,77	1,12	1,45	1,74	2,02	—	2,63	—	—	—	—	—	4,80
2,02	—	—	—	—	—	0,57	1,00	1,35	1,68	1,95	2,26	—	—	—	—	—	—	—
2,10	—	—	—	—	—	—	0,83	1,25	1,56	1,88	—	—	2,83	—	3,53	—	—	—
2,26	—	—	—	—	—	—	—	0,90	1,35	1,68	2,02	—	—	3,05	—	—	—	—
2,44	—	—	—	—	—	—	—	—	0,96	1,45	1,81	—	—	—	3,28	3,80	4,10	—
2,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,04	1,56	1,95	—	—	—	—	—	4,50
2,83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,12	1,62	2,10	—	—	—	—	—
3,05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,20	1,74	2,26	—	3,28	—	—
3,28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,30	1,88	2,44	3,05	3,53	—
3,53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,40	2,10	—	3,28	3,80
3,80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,56	2,44	—	3,53
4,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,88	2,44	—
4,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,68	2,63
4,80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,95
5,20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. При замене провода, диаметр которого указан в верхнем горизонтальном ряду, двумя другими один берется из вертикального столбца под данным диаметром, второй—по горизонтали влево от него в первом вертикальном столбце.

Например, провод ∅ 1,25 заменяется проводами ∅ 1,16+∅0,47 или ∅ 1,12+∅ 0,55, или ∅ 1,08+∅0,62 и т. д.

ГРАФИК ВЫПОЛНИМОСТИ ОДНОСЛОЙНЫХ И ДВУХСЛОЙНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ОБМОТОК ПРИ ДРОБНОМ ЧИСЛЕ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ — q

(Синхронная скорость вращения), *об/мин*	z / $2p$	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72
3 000	2	3	4	5	6	7	8	9	10	—	—
1 500	4	$1\frac{1}{2}$	2	$2\frac{1}{2}$	3	$3\frac{1}{2}$	4	$4\frac{1}{2}$	5	$5\frac{1}{2}$	6
1 000	6	1	—	—	2	—	—	3	—	—	4
750	8	—	1	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{3}{4}$	2	$2\frac{1}{4}$	$2\frac{1}{2}$	$2\frac{3}{4}$	3
600	10	—	—	1	$1\frac{1}{5}$	$1\frac{2}{5}$	$1\frac{3}{5}$	$1\frac{4}{5}$	2	$2\frac{1}{5}$	$2\frac{2}{5}$
500	12	—	—	—	1	—	—	$1\frac{1}{2}$	—	—	2

Продолжение приложения 8

Дополнительный график выполнимости двухслойных трехфазных обмоток

(Синхронная скорость вращения), *об/мин*	z / $2p$	15	21	27	33	39	45	51	57	63	69
3 000	2	$2\frac{1}{2}$	$3\frac{1}{2}$	$4\frac{1}{2}$	$5\frac{1}{2}$	$6\frac{1}{2}$	$7\frac{1}{2}$	$8\frac{1}{2}$	—	—	—
1 500	4	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{3}{4}$	$2\frac{1}{4}$	$2\frac{3}{4}$	$3\frac{1}{4}$	$3\frac{3}{4}$	$4\frac{1}{4}$	$4\frac{3}{4}$	$5\frac{1}{4}$	$5\frac{3}{4}$
1 000	6	—	—	$1\frac{1}{2}$	—	—	$2\frac{1}{2}$	—	—	$3\frac{1}{2}$	—
750	8	—	—	$1\frac{1}{8}$	$1\frac{3}{8}$	$1\frac{5}{8}$	$1\frac{7}{8}$	$2\frac{1}{8}$	$2\frac{3}{8}$	$2\frac{5}{8}$	$2\frac{7}{8}$
600	10	—	—	—	$1\frac{1}{10}$	$1\frac{3}{10}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{7}{10}$	$1\frac{9}{10}$	$2\frac{1}{10}$	$2\frac{3}{10}$
500	12	—	—	—	—	—	$1\frac{1}{4}$	—	—	$1\frac{3}{4}$	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

КОЛИЧЕСТВО КАТУШЕЧНЫХ ГРУПП В ФАЗЕ И РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ШАГИ ПО ПАЗАМ В ДВУХСЛОЙНЫХ И ОДНОСЛОЙНЫХ СЕКЦИОННЫХ ОБМОТКАХ „ВРАЗВАЛКУ“

Скорость вращения, *об/мин*	Число пазов статора	Шаг по пазам	Число катушечных групп в фазах × число катушек в группе
а) Двухслойная обмотка			
3 000	12	1—6	2×2
3 000	18	1—8	2×3
3 000	24	1—9	2×4
3 000	30	1—11	2×5
3 000	36	1—13	2×6
3 000	48	1—18	2×8
1 500	18	1—5	2×1+2×2
1 500	24	1—6	4×2
1 500	27	1—7	3×2+1×3
1 500	36	1—8	4×3
1 500	42	1—9	2×3+2×4
1 500	48	1—11	4×4
1 500	54	1—13	2×4+2×5
1 500	60	1—14	4×5
1 000	27	1—5	3×1+3×2
1 000	36	1—6	6×2
1 000	45	1—7	3×2+3×3
1 000	54	1—8	6×3
1 000	72	1—11	6×4
750	36	1—5	4×1+4×2
750	48	1—6	8×2
750	54	1—7	6×2+2×3
750	60	1—7	4×2+4×3
750	72	1—8	8×3
б) Однослойная секционная обмотка „вразвалку“			
3 000	12	1—6	2×1
3 000	18	1—8	1×1+1×2
3 000	24	1—11	2×2
3 000	30	—	—
3 000	36	1—16	2×3
3 000	48	1—21	2×4
1 500	18	—	—
1 500	24	1—6	4×1
1 500	27	—	—
1 500	36	1—8; 1—9	2×1+2×2
1 500	42	—	—
1 500	48	1—11	4×2
1 500	54	—	—
1 500	60	—	—
1 000	27	—	—

Скорость вращения, *об/мин*	Число пазов статора	Шаг по пазам	Число катушечных групп в фазах × число катушек в группе
1 000	36	1—6	6×1
1 000	45	—	—
1 000	54	1—8; 1—9	3×1+3×2
1 000	72	1—11	6×2
750	36	—	—
750	48	1—6	8×1
750	54	—	—
750	60	—	—
750	72	—	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

ЧЕРЕДОВАНИЕ КАТУШЕЧНЫХ ГРУПП ПРИ ДРОБНЫХ ЧИСЛАХ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ $q = b + \frac{c}{d}$

Число пазов на полюс и фазу q	Чередование катушечных групп
$1\frac{1}{2}$	(1—2) (1—2) и т. д.
$1\frac{1}{4}$	(1—1—1—2), (1—1—1—2) и т. д.
$1\frac{3}{4}$	(1—2—2—2), (1—2—2—2) и т. д.
$1\frac{1}{5}$	(1—1—1—1—2), (1—1—1—1—2) и т. д.
$1\frac{2}{5}$	(2—1—2—1—1), (2—1—2—1—1) и т. д.
$1\frac{3}{5}$	(1—2—1—2—2), (1—2—1—2—2) и т. д.
$1\frac{4}{5}$	(1—2—2—2—2), (1—2—2—2—2) и т. д.
$1\frac{1}{7}$	(1—1—1—1—1—1—2), (1—1—1—1—1—1—2) и т. д.
$1\frac{2}{7}$	(1—2—1—1—1—2—1), (1—2—1—1—1—2—1) и т. д.
$1\frac{3}{7}$	(1—2—1—2—1—2—1), (1—2—1—2—1—2—1) и т. д.

Число пазов на полюс и фазу q	Чередование катушечных групп
$1\frac{4}{7}$	(2—1—2—1—2—1—2), (2—1—2—1—2—1—2) и т. д.
$1\frac{5}{7}$	(2—1—2—2—2—1—2), (2—1—2—2—2—1—2) и т. д.
$1\frac{6}{7}$	(1—2—1—1—1—2—1), (1—2—1—1—1—2—1) и т. д.
$2\frac{1}{2}$	(2—3), (2—3) и т. д.
$2\frac{1}{4}$	(2—2—2—3), (2—2—2—3) и т. д.
$3\frac{1}{4}$	(3—3—3—4), (3—3—3—4) и т. д.
$4\frac{1}{5}$	(4—4—4—4—5), (4—4—4—4—5) и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин А. С. и Перекалин М. А., Электротехника, Госэнергоиздат, 1963.
2. Пиотровский Л. М., Электрические машины, Госэнергоиздат, 1963.
3. Костенко М. П. и Пиотровский Л. М., Электрические машины, Госэнергоиздат, 1958.
4. Сергеев П. С., Электрические машины, Госэнергоиздат, 1962.
5. Ермолин Н. П., Электрические машины малой мощности, изд-во «Высшая школа», 1962.
6. Юферов Ф. М., Электрические двигатели автоматических устройств, Госэнергоиздат, 1959.
7. Харитонов А. М., Многоскоростные электродвигатели, Госэнергоиздат, 1954.
8. Зимин В. И., Каплан М. Я. и др., Обмотки электрических машин, Госэнергоиздат, 1961.
9. Виноградов Н. В, Обмотчик электрических машин, Трудрезервиздат, 1961.

10. Козлов Е. М., Механизация обмоточно-изоляционных работ при производстве электрических машин, Госэнергоиздат, 1963.
11. Рубо Л. Г., Пересчет и ремонт асинхронных двигателей мощностью до 100 *квт*, Госэнергоиздат, 1961.
12. Дреиов П. В., Справочник по ремонту электрических машин, Гостехиздат УССР, 1958.
13. Андриевский С. К. и Шапиро М. Н., Ремонт электрических машин и пускорегулирующей аппаратуры, Гостехиздат УССР, 1959.
14. Коварский Е. М., Ремонт электрических машин, Госэнергоиздат, 1962.
15. Девятков А. Ф., Волоцкий Н. П., Пискунов С. А. и Шац Е. Л., Ремонт электрических машин и трансформаторов, Сельхозгиз, 1960
16. Чечет Ю. С., Выбор основных размеров и параметров однофазных асинхронных микродвигателей, «Электричество», 1948, № 11.
17. Чечет Ю. С., Расчет вспомогательной обмотки однофазных асинхронных микродвигателей, «Электричество», 1949, № 2.
18. Жерве Г. К., Расчет асинхронного двигателя при перемотке, Госэнергоиздат, 1959.
19. Мещеряков В. В. и Ченцов И. М., Пересчет электрических машин и таблицы обмоточных данных, Госэнергоиздат, 1950.
20. Лопухина Е. М и Сомихина Г. С., Расчет асинхронных микродвигателей однофазного и трехфазного тока, Госэнергоиздат, 1961.
21. Справочник по электротехническим материалам. Под общей редакцией Андриянова К. А., Богородицкого Н. П., Корицкого Ю. В. и Тареева Б. М., т. I, ч. 1, Госэнергоиздат, 1958; т I, ч. 2, Госэнергоиздат, 1959.
22. Богородицкий Н. П., Пасынков В. В. и Тареев Б. М., Электротехнические материалы, Госэнергоиздат, 1963.
23. Корицкий Ю. В., Электротехнические материалы, Госэнергоиздат, 1962.
24. Рубо Л. Г., Изоляционные лаки и их применение, Госэнергоиздат, 1962.
25. Торопцев Н. Д., Применение трехфазного асинхронного двигателя в схеме однофазного включения с конденсатором, Госэнергоиздат, 1963.
26. Жерве Г. К., Промышленные испытания электрических машин, Госэнергоиздат, 1959.
27. Пиотровский Л. М., Васютинский С. Б. и Несговорова Е. Д., Испытание электрических машин, Госэнергоиздат, 1960.